

# Schriftenreihe Umweltingenieurwesen

Band 99

Dissertation

*Mathias Gießler*

**Ein prozessbasiertes Modell zur wirtschaftlich-  
technischen Abbildung von Abwasserunter-  
nehmen – Beispielhafte Anwendung für eine  
ländliche Region mit Bevölkerungsrückgang**

Professur

**Wasserwirtschaft**

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Dissertation

## HERAUSGEBER

Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Tränckner  
Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Professur Wasserwirtschaft  
18051 Rostock

## CIP-KURZTITELAUFNAHME

Dissertation Mathias Gießler  
Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Rostock, 2020

© Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät,  
18051 Rostock

## BEZUGSMÖGLICHKEITEN

Universität Rostock  
Universitätsbibliothek, Schriftentausch,  
18051 Rostock  
Tel.: 0381/498-8637, Fax: 0381/498-8632  
E-Mail: [maria.schumacher@ub.uni-rostock.de](mailto:maria.schumacher@ub.uni-rostock.de)

Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Professur Wasserwirtschaft  
Satower Straße 48, 18059 Rostock  
Tel.: 0381/498-3461, Fax: 0381/498-3462

ISBN 978-3-86009-516-4  
DOI: [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002790](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002790)

Universität Rostock  
Professur Wasserwirtschaft

## **Vorwort**

Die Abwasserwirtschaft in Deutschland steht vor großen Herausforderungen bei der Anpassung an sich ändernde demografische, rechtliche, wirtschaftliche und klimatische Rahmenbedingungen. Aufgrund der hohen Kapitalbindung und besonderen wasserwirtschaftlichen Verantwortung von Abwasserentsorgungsunternehmen muss eine nachhaltige Unternehmensstrategie diese Änderungen frühzeitig antizipieren und geeignete Anpassungsmaßnahmen ergreifen. Die komplexe Infra- und Kostenstruktur, kombiniert mit den besonderen beitrags- und gebührenrechtlichen Gegebenheiten erschweren die Analyse möglicher Einflüsse auf das technisch-wirtschaftliche System und die Ableitung optimaler Maßnahmenpakete.

Diese Herausforderungen wurden bereits früh von der DWA erkannt und durch eine eigens gegründete Arbeitsgruppe WI 1.3 untersucht. Aufgrund der hohen Heterogenität der Abwasserentsorgungsunternehmen und der regionalen Herausforderungen konnten in der Arbeitsgruppe nur szenarienhafte Aussagen für ein definiertes „mittleres Unternehmen“ abgeleitet werden. Je nach Ausprägung der Szenarien wurden dabei zum Teil alarmierende wirtschaftliche Entwicklungen identifiziert. Die dort entwickelten Ansätze basieren auf der Extrapolation von mittleren Kennzahlen aus dem Unternehmens- und Prozessbenchmarking und lassen deshalb sich nur eingeschränkt auf ein konkretes Unternehmen übertragen.

Hier setzt die Arbeit von Herrn Gießler an. Zentrales Ziel seiner Arbeit ist die Entwicklung eines szenarienfähigen Prozessmodells für Abwasserunternehmen, in welchem die technische Infrastruktur und die Kostenstruktur im direkten Zusammenhang zu wesentlichen äußeren Rahmenbedingungen abgebildet werden. Aufgrund der in Norddeutschland dominierenden Trennkanalisation betrachtet das Modell ausschließlich die Schmutzwasserentsorgung. Es gliedert sich dabei in drei Module: i) Kanalnetz, ii) Kläranlage und iii) Kosten- und Entgeltkalkulation. Die Module für die technischen Teilsysteme beinhalten jeweils verfahrenstechnisches Teilmodell für die betriebskostenrelevanten Parameter und ein Asset-Management-Modell zur Bestimmung des infrastrukturellen Zustands in Abhängigkeit von den Sanierungs-/Erneuerungsaufwendungen. Das Kosten- und Entgeltmodul führt die Kostenkalkulation auf Unternehmensebene einschließlich der unterstützenden Prozesse (Verwaltung) zusammen und berechnet die resultierenden Entgelte (Gebühren, Beiträge) unter Berücksichtigung des geltenden Kommunalabgabenrechts und der unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen. Die veränderlichen Rahmenparameter werden (angeschlossene Einwohner, Preis-, Lohnentwicklung, Wasserverbrauch) als Zeitreihe vorgegeben. Die einzelnen Zeitreihen werden durch statistische Regressionen bzw. durch multiplikative Zeitreihenmodelle entwickelt und anschließend zu konsistenten Entwicklungsszenarien kompiliert. Das Modell wurde beispielhaft für einen Aufgabenträger in Mecklenburg-Vorpommern aufgebaut, kalibriert und die Analyse unterschiedlicher Entwicklungsszenarien und Anpassungsoptionen genutzt.

Durch eine deterministische Beschreibung des gesamten Systems ist das Modell extrapolierbar und geeignet, auch komplexe Anpassungsoptionen zu bewerten. Die entwickelten Berechnungsansätze sind sehr gut dokumentiert und aufgrund ihrer konsequenten Prozessorientierung für jedes Unternehmen in Deutschland anwendbar. Der integrale Ansatz kann insbesondere die mittelfristige strategische Unternehmensentwicklung unterstützen.

Ich wünsche der Arbeit deshalb auch im Interesse einer nachhaltigen Entwicklung unserer Abwasserwirtschaft eine interessierte Aufnahme.

Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Tränckner

# Universität Rostock



Traditio et Innovatio

Aus der Professur für Wasserwirtschaft  
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

## **Ein prozessbasiertes Modell zur wirtschaftlich-technischen Abbildung von Abwasserunternehmen**

Beispielhafte Anwendung für eine ländliche Region mit Bevölkerungsrückgang

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Rostock

vorgelegt von M.Sc. Mathias Gießler  
Rostock

Rostock, 29.11.2019

Gutachter: Prof. Dr. -Ing. habil. Jens Tränckner  
Professur für Wasserwirtschaft  
Universität Rostock

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Silvio Beier  
Professur für Technologien urbaner Stoffstromnutzungen  
Universität Weimar

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ruben-Laurids Lange  
Fachbereich Wassertechnologien in der Versorgung und Entsorgung  
Westfälische Hochschule

Einreichungsdatum: 29.11.2019

Verteidigung: 16.10.2020

## Kurzzusammenfassung

Zur Untersuchung der wirtschaftlich-technischen Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Schmutzwasserentsorgung wird in dieser Arbeit ein Modell zur ganzheitlichen und prozessbasierten Abbildung der Infra- und Kostenstruktur von öffentlichen Aufgabenträgern der Abwasserwirtschaft präsentiert. Das Modell besteht aus drei Modulen: 1.) *SWEN* zur Beschreibung des Kanalnetz-zustandes, 2.) *KA* zur Abbildung der relevanten Prozesse in Kläranlagen und 3.) *KAG* zur Kosten- und Gebührenkalkulation. Auf Grundlage dieses Modells wird der Ist-Zustand eines repräsentativen Aufgabenträgers aus der Region Mecklenburg-Vorpommern analysiert und die zukünftige Entwicklung prognostiziert. Im Modell werden durch Rahmenparameter die zukünftigen wirtschaftlichen und sozioökonomischen Bedingungen beschrieben. Für die Monte-Carlo-Simulation und Szenarienbetrachtung wird die zukünftige Entwicklung der Rahmenparameter auf Basis von statistischen Langzeitreihen und Trendanalysen unter Verwendung linearer Regressionen und multiplikativer Zeitreihenmodelle prognostiziert. Die Modellanwendung erfolgt unter dem Aspekt der Bewertung von wirtschaftlich-technischen Auswirkungen eines Bevölkerungsrückgangs, dabei wird das Modell zur Analyse und Bewertung der folgenden Untersuchungsschwerpunkte genutzt: 1.) Determinierung des maßgebenden Gebührentreibers, 2.) Ermittlung der zukünftigen Kosten- als auch Gebührenentwicklung und der sich daraus ergebenden Haushaltsbelastung und 3.) Quantifizierung von dagegenwirkenden Maßnahmen und Ermittlung deren Potentials zur Minderung von ausgeprägten Gebührenanstiegen. Aus den Ergebnissen einer Sensitivitätsanalyse werden als maßgebliche Gebührentreiber die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen benannt. Die Analyse der Szenarien ergibt, dass auch bei positiven Rahmenbedingungen es zu moderaten Gebührensteigerungen kommen wird. Bei einem sehr negativen wirtschaftlichen und sozioökonomischen Umfeld bedarf es Anpassungsmaßnahmen um den Gebührenanstieg zu reduzieren. Die modulare Integration von drei Maßnahmen, aus einem größeren Handlungsportfolio, in das Modell legt dar, dass die zukünftige Haushaltsbelastung auf ein nach OECD Maßstäben angemessenes Niveau gemindert werden kann.

## Abstract

In order to investigate the economic and technical consequences of demographic change on wastewater disposal, this study presents a model for holistic and process-based computation of the infrastructure and cost structure of wastewater utilities. The model consists of three modules: 1.) SWEN for describing the condition of sewer networks, 2.) *KA* for mapping the relevant processes in wastewater treatment plants and 3.) *KAG* for calculating expenses in the cost categories and resulting charges. By virtue of this model the prevailing state of a representative utility from the Mecklenburg-Western Pomerania region is analyzed, and the future development is prognosticated. In the model the future economic and socio-economic conditions are described by framework parameters. The future development of framework parameters is predicted following assessment of long-term series and trend analysis by linear regression and multiplicative time series model. Furthermore, using the predicted parameters, framework conditions for the Monte Carlo simulation and scenario analysis are conceived. The application of the model is based on the assessment of the economical and technical consequences of a population decline. The model is used to analyze and assess the following main research areas; 1) Determination of the relevant charge driver, 2) Determination of the future cost and charge development, as well as, resulting budgetary burden and 3) Quantification of countermeasures and evaluation of their potential to lessen high charge increases. Derived out of the resulting reports of sensitivity analysis; economic framework conditions are named as relevant drivers of charges. The analysis of the scenarios shows that moderate charge increases will occur even in the case of positive framework conditions. In a very negative economic and socio-economic environment, measures are needed to cut down the increase in charges. The modular integration of three measures, from a larger portfolio of requirements into the model shows that the future budgetary burden can be reduced to an appropriate level according to OECD standards.



## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis .....	II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
Symbolverzeichnis.....	IV
1. Einleitung.....	1
1.1 Veranlassung .....	1
1.2 Forschungsfragen, Hypothesen und Zielstellung .....	3
1.3 Einordnung und Abgrenzung .....	4
1.4 Gliederung der Arbeit.....	6
2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung.....	9
2.1 Infrastrukturelle und technische Anpassungsmaßnahmen .....	9
2.2 Organisatorische Anpassungen .....	14
2.3 Finanzwirtschaftliche Anpassungen.....	18
3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft.....	25
3.1 Prozessmodellierung .....	25
3.1.1 Kanalalterungsmodelle.....	25
3.1.2 Berechnung und Modellierung von Kläranlagenprozessen.....	29
3.2 Methoden zur Herleitung und Prädiktion von Kosten sowie zur Betrachtung ganzheitlicher Kostenstrukturen von Aufgabenträgern.....	34
3.3 Bedarf eines ganzheitlichen Ansatzes zur wirtschaftlich - technischen Analyse von Aufgabenträgern der Abwasserwirtschaft .....	43
4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells.....	45
4.1 Vorgehensweise .....	45
4.2 Datenerhebung und Datenverfügbarkeit .....	46
4.3 Festlegung der Rahmenparameterwerte .....	49
4.3.1 Auswahl der Rahmenparameter .....	49
4.3.2 Analyse und Auswertung von statistischen Langzeitreihen.....	49
4.3.3 Prädiktion der Rahmenparameterwerte bis zum Prognosehorizont anhand von Zeitreihenmodellen.....	57
4.3.4 Festlegung der Rahmenparameterwerte für die MCS und Szenarien .....	65
4.4 Modellaufbau .....	68

4.4.1	Modul SWEN .....	69
4.4.2	Modul KA .....	73
4.4.3	Modul K GK .....	91
4.5	Implementierung und Applikation der Monte-Carlo-Simulationsmethodik .....	116
5.	Entwicklung und Implementierung von Maßnahmenmodulen .....	119
5.1	Auswahl von Anpassungsmaßnahmen zur Integration in das Modell .....	119
5.2	Schlammverwertungszentrum .....	121
5.3	Zentralisierung der Abwasserbehandlung .....	128
5.4	Zusammenschluss von Aufgabenträgern .....	137
6.	Parameteranpassung und Modellvalidierung anhand eines beispielhaften Aufgabenträgers in M-V .....	141
6.1	Beschreibung des exemplarischen Aufgabenträgers .....	141
6.2	Zusätzlich erhobene Daten für die Parameteranpassung und Validierung sowie zu berücksichtigende Besonderheiten des Aufgabenträgers bei der Modellierung .....	142
6.3	Anpassung und Validierung der prozessbasierten Parameter .....	145
6.3.1	Fällmittel .....	145
6.3.2	Schlammmengen .....	146
6.3.3	Elektrische Energieerzeugung .....	147
6.3.4	Elektrische Energieverbräuche .....	148
6.3.5	Kanalzustandsklassen .....	149
6.4	Validierung ökonomischer Parameter .....	151
6.4.1	Kanalinstandhaltungskosten .....	152
6.4.2	Reinvestitionskosten der Kläranlagen .....	152
6.4.3	Prozessbasierte Betriebsstoffe, Erträge und bezogene Leistungen .....	153
6.4.4	Gesamtkosten und Mengengebühr .....	153
6.5	Einfluss der Parameteranpassung auf die Modellgüte .....	155
6.6	Beurteilung der Validierungsergebnisse .....	158
7.	Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Rahmenparametereinflusses auf die Mengengebührentwicklung .....	160
7.1	Bevölkerungs- und Schmutzwassermengenveränderung .....	160
7.2	Inflationsrate und Zinssatz .....	163
7.3	Zusammenfassende Wirkungsbetrachtung der Rahmenparameter auf die Mengengebührentwicklung .....	169

8.	Ergebnisse der Prognosesimulationen.....	170
8.1	Wahrscheinlichkeitsbereich der Mengengebührenentwicklung aus der Monte-Carlo-Simulation.....	170
8.2	Detaillierte Parameteranalyse basierend auf Szenario-Simulationen.....	173
8.3	Ergebnisvergleich zu analogen nationalen und regionalen Prognosen .....	178
9.	Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte .....	181
9.1	Schlammverwertungszentren .....	181
9.2	Zentralisierung der Abwasserbehandlung.....	184
9.3	Zusammenschluss von Aufgabenträgern.....	190
9.4	Kombinationen von Anpassungsmaßnahmen .....	194
9.4.1	Kombination von Zusammenschluss und Schlammverwertungszentren .....	195
9.4.2	Kombination von Fusionierung und Zentralisierung .....	199
9.5	Zusammenfassende Betrachtung der Anpassungsmaßnahmeneffekte.....	202
10.	Zusammenfassung und Ausblick .....	207
10.1	Zusammenfassung.....	207
10.2	Ausblick .....	211
11.	Literaturverzeichnis.....	213
	Anhang.....	V

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Teilmengen der sektoralen Handlungsfelder in der Wasserwirtschaft.....	5
Abbildung 3-1:	Überblick methodischer Ansätze der Kanalalterungsmodellierung.....	27
Abbildung 3-2:	Überblick methodischer Ansätze für die Berechnung von Kläranlagenprozessen.....	30
Abbildung 3-3:	Überblick methodischer Ansätze für die Ermittlung, Prädiktion und Simulation von Kosten in der Abwasserwirtschaft.....	34
Abbildung 3-4:	Überblick analytischer Benchmarkingmethoden.....	37
Abbildung 4-1:	Vorgehensweise bei der Modellentwicklung.....	46
Abbildung 4-2:	Bevölkerungszahl und relative Bevölkerungsentwicklung in M-V.....	50
Abbildung 4-3:	Häufigkeiten, Dichte- und Verteilungsfunktion der jährlichen relativen Bevölkerungsentwicklung.....	51
Abbildung 4-4:	VPI und BPI Entwicklung sowie die kumulierten Summen ab 1969.....	52
Abbildung 4-5:	Häufigkeiten, Dichte- und Verteilungsfunktion der jährlichen Veränderungsrate des VPI.....	53
Abbildung 4-6:	Häufigkeiten, Dichte- und Verteilungsfunktion der jährl. Veränderungsrate des BPI.....	54
Abbildung 4-7:	Entwicklung der Umlaufrenditen der inländischen Inhaberschuldverschreibungen aus Anleihen der öffentlichen Hand von 1956-2016.....	55
Abbildung 4-8:	Häufigkeiten, Dichte- und Verteilungsfunktion des Kreditzinssatzes.....	55
Abbildung 4-9:	Entwicklung der einwohnerspezifischen häuslichen Wasserverbrauchsmengen.....	56
Abbildung 4-10:	Häufigkeiten, Dichte- und Verteilungsfunktion der Veränderung der einwohnerspezifischen häuslichen Wasserverbrauchsmengen.....	57
Abbildung 4-11:	ELR-Prädiktion der Bevölkerungsentwicklung in M-V bis 2050.....	58
Abbildung 4-12:	ELR-Prädiktion des VPI bis 2050.....	59
Abbildung 4-13:	ELR-Prädiktion des BPI bis 2050.....	59
Abbildung 4-14:	ELR-Prädiktion durch des Kreditzinssatzes bis 2050.....	60
Abbildung 4-15:	ELR-Prädiktion des häusl. einwohnerspez. Wasserverbrauchs in D bis 2050.....	60
Abbildung 4-16:	Random-Zyklen-Prädiktion (eine Variation des Zeitreihenmodells + MCS) der relativen Veränderung der Kreditzinssätze in D bis 2050.....	63
Abbildung 4-17:	Random-Zyklen-Prädiktion (eine Variation des Zeitreihenmodells + MCS) der relativen Veränderung einwohnerspez. Wasserverbräuche in D bis 2050.....	63
Abbildung 4-18:	Kreditzinssätze bis 2050 des multipl. Zeitreihenmodells.....	64
Abbildung 4-19:	Einwohnerspez. Wasserverbräuche bis 2050 des multipl. Zeitreihenmodells.....	64
Abbildung 4-20:	Schematische Darstellung des modularen Modellaufbaus.....	68
Abbildung 4-21:	Schematische Darstellung der Berechnungsabläufe des Moduls SWEN.....	69
Abbildung 4-22:	Schematische Darstellung der Berechnungsabläufe des Moduls KA.....	74
Abbildung 4-23:	Schematische Darstellung der Berechnungsabläufe des Moduls KGK.....	92
Abbildung 4-24:	Schematische Abbildung der MCS-Rechenroutine und Integration ins Modell.....	117
Abbildung 5-1:	Schematische vereinfachte Abbildung der Rechenabläufe des Moduls SVZ.....	122

Abbildung 5-2:	Schematische Darstellung des Prozessablaufs vom Rechenalgorithmus der statischen Betrachtung im Modul Zentralisierung.....	130
Abbildung 5-3:	Schematische Darstellung des Rechenalgorithmus der dynamischen Betrachtung im Modul Zentralisierung.....	136
Abbildung 5-4:	Schematische Darstellung der Berechnungsabläufe im Modul Zusammenschluss.....	139
Abbildung 6-1:	Schematische Stoffstrombilanz für KA 12 des exemplarischen Aufgabenträgers.....	144
Abbildung 6-2:	Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Schlammvolumina von 2014.....	146
Abbildung 6-3:	Energiebilanzierung zwischen gemessenen und simulierten Werten des elektrischen Energieverbrauchs und Energieerzeugung von KA 12 in 2014.....	148
Abbildung 6-4:	Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten elektrischen KA Energieverbräuche von 2014.....	149
Abbildung 6-5:	Simulierte Kanalzustände des exemplarischen Aufgabenträgers, links in relativen und rechts in absoluten Werten.....	150
Abbildung 6-6:	Kostenstruktur (links) und Mengengebühr (rechts) in Jahresscheiben im Validierungszeitraum.....	154
Abbildung 6-7:	Rel. Abw. zw. Ergebnissen ohne und mit Parameteranpassung und realen Schlammvolumina.....	156
Abbildung 6-8:	Rel. Abw. zw. Ergebnissen ohne und mit Parameter-anpassung und realen elektr. Energie-verbräuchen.....	156
Abbildung 6-9:	Vergleich der simulierten Mengengebühren mit und ohne Parameteranpassung.....	158
Abbildung 7-1:	Auswirkung der Inflationsrate und Kreditzinssätze auf die Mengengebührenentwicklung durch Investitionen in KA, SWEN sowie Betriebs- und Wartungskosten.....	164
Abbildung 7-2:	Einzelbetrachtung des Inflationseffektes bei einem Kreditzinssatz von 4 % (links) und des Zinseffektes bei einer Inflationsrate von 2,5 % (rechts).....	165
Abbildung 7-3:	Auswirkungen der Inflationsrate und des Kreditzinssatzes auf die Mengengebührenentwicklung durch Abschreibungen und Zinskosten für Reinvestitionen der KA.....	165
Abbildung 7-4:	Auswirkungen der Inflationsrate und des Kreditzinssatzes auf die Mengengebührenentwicklung durch Abschreibungen und Zinskosten des SWEN.....	166
Abbildung 7-5:	Auswirkungen der Inflationsrate und des Kreditzinssatzes auf die Mengengebührenentwicklung durch Instandhaltungskosten des SWEN.....	166
Abbildung 7-6:	Entwicklung der Mengengebühr durch Überlagerung von Inflation und Sanierungs-quote.....	167
Abbildung 7-7:	Auswirkung der Sanierungsquote auf die mittlere ZK des SWEN und der Mengengebührenentwicklung bei einer Inflationsrate von 2,5 % und einem Kreditzinssatz von 4 %.....	168
Abbildung 7-8:	Entwicklung der jährlichen Reparaturkosten und der mittleren ZK des SWEN bei einer Sanierungsquote von 1,5 % (ohne inflationäre Einflüsse).....	168
Abbildung 8-1:	Anhand der MCS resultierende Mengengebührenentwicklung bis 2050 bei Überlagerung der maximalen Rahmenparameterausprägungen.....	170

Abbildung 8-2:	Mengengebührenentwicklung bei restringierter Rahmenparametereinstellung.....	171
Abbildung 8-3:	Resultierende Haushaltsbelastungen aus der Mengengebührenentwicklung...	171
Abbildung 8-4:	Energiebilanz von KA 12 für Sz II und Sz III.....	174
Abbildung 8-5:	Relative Veränderung der Kostenarten zum Ende des Prognosezeitraums.....	176
Abbildung 8-6:	Jährliche Mengengebührenentwicklung basierend auf den Rahmenbedingungen der Szenarien.....	177
Abbildung 8-7:	Gegenüberstellung der Prognoseergebnisse zu anderen nationalen und regionalen Studien.....	180
Abbildung 9-1:	SVZ-Konzept für den Aufgabenträger ohne industriellen Indirekteinleiter (links) mit zusätzlicher Optimierung der Schlammtransportwege (rechts).....	181
Abbildung 9-2:	Resultierende Zentralisierungskonzepte bei einem Kostenanteil von 60 % (Sz I-Sz III) bis 100 % (Sz I, oben-links), einem Kostenanteil von 20 % für Sz I (oben-rechts), Sz II (unten-links) und Sz III (unten-rechts).....	186
Abbildung 9-3:	KA-Bestand der vier angrenzenden Aufgabenträger unterteilt nach GK und Verfahrenstechnik.....	194
Abbildung 9-4:	Konzeptvarianten bei einem Zusammenschluss von AT IV und Kombination der Anpassungsmaßnahme SVZ mit einem (links) und zwei Zentren (rechts).....	196
Abbildung 9-5:	Zentralisierungskonzepte bei Zusammenschluss mit AT IV bei einem Investitions-kostenanteil von 100 % (links) und 60 % (rechts).....	199
Abbildung 9-6:	Jährliches Einsparpotential und resultierende Haushaltsbelastung in den Szenarien eines ZPH durch Einzelmaßnahmen (links) und Maßnahmenkombintaionen (rechts).....	204
Abbildung 9-7:	Anhand der Anpassungsmaßnahmen in den Szenarien resultierende absolute und relative prognostizierte Haushaltsbelastung in 2050 für einen ZPH.....	205

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Anpassungsmaßnahmen der technischen Infrastruktur im Bereich der Schmutzwasserentsorgung.....	10
Tabelle 2-2:	Anpassungsmaßnahmen im Bereich der Organisationsstruktur.....	14
Tabelle 2-3:	Anpassungsmaßnahmen im finanzwirtschaftlichen Bereich.....	18
Tabelle 4-1:	Erhobene Datensätze als Eingangsparameter und Modellgrundlage.....	47
Tabelle 4-2:	Häufigkeitsverteilung, Werte der Verteilungs- und Dichtefunktion der jährlichen relativen Bevölkerungsentwicklung.....	51
Tabelle 4-3:	Einstellungen und Testergebnis des $X^2$ -Test für die Bevölkerungsentwicklung...	51
Tabelle 4-4:	Häufigkeitsverteilung, Werte der Verteilungs- und Dichtefunktion der jährlichen Veränderungsrate des VPI.....	53
Tabelle 4-5:	Einstellungen und Testergebnis des $X^2$ -Test für den VPI.....	53
Tabelle 4-6:	Häufigkeitsverteilung, Werte der Verteilungs- und Dichtefunktion der jährlichen Veränderungsrate des BPI.....	54
Tabelle 4-7:	Einstellungen und Testergebnisse des $X^2$ - und K-S-Test für den BPI.....	54
Tabelle 4-8:	Häufigkeitsverteilung, Werte der Verteilungs- und Dichtefunktion des Kreditzinssatzes.....	55
Tabelle 4-9:	Einstellungen und Testergebnisse des $X^2$ - und K-S-Test für den Kreditzinssatz.....	56
Tabelle 4-10:	Häufigkeitsverteilung, Werte der Verteilungs- und Dichtefunktion der Veränderung der einwohnerspezifischen häuslichen Wasserverbrauchsmengen.....	57
Tabelle 4-11:	Einstellungen und Testergebnisse des $X^2$ - und K-S-Test für die einwohnerspezifischen häuslichen Wasserverbrauchsmengen.....	57
Tabelle 4-12:	Rahmenparametereinstellung für die MCS.....	65
Tabelle 4-13:	Restriktion der Rahmenparameter und deren Schrittweite für die detailliertere MCS.....	66
Tabelle 4-14:	Rahmenparametereinstellung für die Szenarien.....	67
Tabelle 4-15:	Abscheideleistung der VK nach DWA-A-201 (2005), DWA-A-262 (2006) und ATV-DVWK (2001).....	77
Tabelle 4-16:	Durch Entwässerung erreichbare TS-Gehalte von Schlämmen nach DWA-M-366 (2000).....	81
Tabelle 4-17:	Standardeinstellungen des TS-Gehaltes für die Berechnung der Entsorgungsmengen des anfallenden Schlammes.....	81
Tabelle 4-18:	TS-Gehalte von KA-Schlämmen mit und ohne Behandlung.....	82
Tabelle 4-19:	Einwohnerspezifische elektrische Energieverbräuche in Abhängigkeit von der Verfahrenstechnik und Anlagengröße nach DWA (2012a).....	83
Tabelle 4-20:	Messeinheit, Konzentrations- und Fracht-Schwellenwerte nach Anlage zu §3 AbwAG.....	85
Tabelle 4-21:	MwSt seit 1983.....	89
Tabelle 4-22:	Kostenfunktionen für KA-Verfahrenstechniken.....	89
Tabelle 4-23:	Kostenanteile der Bau-/Herstellungskosten und Nutzungsdauern der Verfahrenstechniken/ Anlagenkomponenten.....	90
Tabelle 4-24:	Zuordnung der betrachteten Kosten im Modell in Kostenstellen und Kostenarten.....	93
Tabelle 5-1:	Kostenfunktion für den Neu- und Ausbau des SVZ nach MULEWF (2014).....	126
Tabelle 5-2:	Betrachtete Kosten der Kostenarten für den Konzeptvergleich.....	131

Tabelle 5-3:	Anzahl an Verbindungskombinationen in Abhängigkeit von der KA-Anzahl in der Reihenschaltung.....	135
Tabelle 6-1:	Konzentrationen der Schmutzwasserströme.....	143
Tabelle 6-2:	Vergleich von simulierten zu verbrauchten Fällmittelmengen.....	145
Tabelle 6-3:	Absolute simulierte und gemessene Schlammvolumina von 2014 sowie deren relative Abweichungen.....	146
Tabelle 6-4:	Prozessbezogene Parameter zur Bestimmung der täglichen Energieerzeugung von KA 12 für 2014.....	147
Tabelle 6-5:	Absolute gemessene und simulierte elektrische Energieverbräuche der KA sowie deren relativen Abweichungen von 2014.....	149
Tabelle 6-6:	Durchschnittliche Anteile der Kanalzustandsklassen für 2001 (DWA 2001) und 2014 (MLUV M-V 2009) und die daraus hergeleiteten Kanallängen bezogen auf das SWEN des Aufgabenträgers.....	149
Tabelle 6-7:	Parametereinstellungen für das Kanalalterungsmodell basierend auf den Durchschnittswerten in M-V.....	150
Tabelle 6-8:	Simulierte Kosten für die Kanalinstandhaltung am Ende des Validierungszeitraumes 2014.....	152
Tabelle 6-9:	Abweichungen zwischen den angegebenen und simulierten KA Restbuchwerten von 2001 und 2014.....	152
Tabelle 6-10:	Absolute und prozentuale Abweichung der simulierten zu den realen Kosten am Ende des Validierungszeitraumes 2014.....	153
Tabelle 6-11:	Absolute und prozentuale Abweichung der simulierten zu den realen Kostenarten.....	154
Tabelle 6-12:	Resultierende Abweichung der simulierten Mengengebühr nach Abzug der in der Simulation nicht berücksichtigten Auflösung von Beiträgen und Fördermittel.....	155
Tabelle 6-13:	Absolute und relative Abweichungen zwischen realen und den ohne Parameteranpassung simulierten prozessbasierten Kosten.....	157
Tabelle 6-14:	Absolute Abweichung der simulierten Kostenpositionen zu den realen Kosten mit und ohne Parameteranpassung.....	157
Tabelle 7-1:	Auswirkung der rel. Bevölkerungsveränderung auf die rel. Entwicklung der Gesamtkosten.....	161
Tabelle 7-2:	Auswirkung der rel. Bevölkerungsveränderung auf die rel. Entwicklung der Mengengebühr.....	161
Tabelle 7-3:	Auswirkung der relativen Veränderung des häuslichen Wasserverbrauchs auf die rel. Entwicklung der Gesamtkosten.....	162
Tabelle 7-4:	Auswirkung der relativen Veränderung des häuslichen Wasserverbrauchs auf die rel. Entwicklung der Mengengebühr.....	162
Tabelle 7-5:	Spannweite der Mengengebührenbeeinflussung durch die Rahmenparameter.....	169
Tabelle 8-1:	Ergebnisse von prozessbasierten Parametern aus der Szenarienbetrachtung.....	173
Tabelle 8-2:	Detaillierte Auflistung der absoluten Veränderungen bei den Kostenarten in den Szenarien zum Ende des Prognosezeitraums.....	174
Tabelle 9-1:	Entwicklung der Energiebilanz innerhalb der Szenarien für KA 12 ohne Berücksichtigung des industriellen Indirekteinleiters im Rahmen der Anpassungsmaßnahme SVZ.....	182
Tabelle 9-2:	Investitionskosten für den Ausbau zur energetischen Faulgasnutzung für KA 12 gestaffelt nach relativen Kostenanteilen für 2015 und 2050.....	183



Tabelle 9-3:	Gesamtkosten- und Mengengebührenveränderung resultierend aus der SVZ-Konzeptumsetzung in den Szenarien, gestaffelt nach Kostenanteilen für 2015 und 2050.....	183
Tabelle 9-4:	Anzahl der Überleitungen und Kostenersparnis bei unterschiedlichen Kostenfaktoren zur Senkung der Gesamtinvestitionskosten.....	185
Tabelle 9-5:	KA-Charakteristik von KA 7 und KA 11.....	187
Tabelle 9-6:	Auswirkungen der Überleitung von KA 7 zu KA 11 auf die Anlagen Charakteristik.....	187
Tabelle 9-7:	Investitionskosten, Abschreibungen und Zinsen aus der dynamischen Kostenberechnung für die Überleitung von KA 7 zu KA 11 bei Kostenanteilen von 50 bis 70 %.....	188
Tabelle 9-8:	Einsparungen durch die Zentralisierung im Bereich des Anlagenbetriebs unterteilt in die betreffenden Kostenarten je Szenario.....	189
Tabelle 9-9:	Gesamtkosten- und Mengengebührenveränderung durch die Zentralisierung in den Szenarien bei einem Kostenanteil von 50 bis 70 %.....	190
Tabelle 9-10:	Überblick über die Vergleichskenndaten der vier angrenzenden Aufgabenträger.....	190
Tabelle 9-11:	Veränderungen der Kosten, Mengengebühr und Haushaltsbelastung eines ZPH für das erste Jahr (2015) des Zusammenschlusses.....	192
Tabelle 9-12:	Veränderung der Kosten und Mengengebühren bei einer Fusion oder Kooperation von AT IV mit dem betrachteten Aufgabenträger in den Szenarien für 2015 und 2050.....	193
Tabelle 9-13:	Einsparpotentiale bei Kombination von Anpassungsmaßnahmen zum Zeitpunkt der vollständigen Maßnahmenumsetzung für AT III und AT IV.....	195
Tabelle 9-14:	Veränderung der prozessbasierten Parameter sowie resultierende Kosten in 2050 bei Fu-SVZ mit einem Zentrum und mit zwei Zentren.....	197
Tabelle 9-15:	Veränderungen in den Kostenarten in 2050 bei Fu-SVZ mit einem Zentrum und mit zwei Zentren.....	198
Tabelle 9-16:	Standortcharakteristika der stillzulegenden und der aufnehmenden KA.....	200
Tabelle 9-17:	Einsparungen und Mehraufwände der Zentralisierungskonzepte in den Kostenarten sowie Veränderung der Gesamtkosten und Mengengebühr.....	201
Tabelle 9-18:	Einsparungen und Mehraufwände der Zentralisierungskonzepte bei den Betriebskosten.....	201
Tabelle 9-19:	Einsparpotentiale der Anpassungsmaßnahmen bei den Gesamtkosten und Mengengebühren.....	202
Tabelle 9-20:	Absolute und relative Haushaltsbelastung für 2050 eines ZPH und SH in den Szenarien.....	206

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AbwAG	Abwasserabgabengesetz
AbwV	Abwasserverordnung
ADM	Anaerobic Digestion Model (deutsch: Anaerobe Faulungsmodelle)
AfA	Absetzung für Abnutzung
AGS	Amtlicher Gemeindeschlüssel
AK	Altersklasse
ARMA	Autoregressive Moving Average
ARMAX	Autoregressive Exogenous Moving Average
ASM	Activated Sludge Model (deutsch: Belebtschlammmodell)
AT	Aufgabenträger
AWW	Abwasserwirtschaft
BB	Belebungsbecken
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BHKW	Blockheizkraftwerk
Bio-P	Biologische Phosphorelimination
BPI	Baupreisindex
BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf von 5 Tagen
BSM	Benchmark Simulation Model (deutsch: Benchmarking-Simulationsmodelle)
BT	Bautechnik
CAMP	Capital Asset Pricing Modell
CBL	Cross-Border-Leasing
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DCF	Discounted Cash-Flow Verfahren
DEA	Data Envelopment Analysis (deutsch: Dateneinhüllungsanalyse)
DGM	Dividend Growth Model
DMU	Decision Making Units (deutsch: Entscheidungseinheiten)
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
E	Einwohner
EBRD	Europäischen Bank für Wiederaufbau und Entwicklung
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EIB	Environmental Impact Bond
EigVO	Eigenbetriebsverordnung (Landesrecht)
ELR	Einfache lineare Regression
ELRG	Einfache lineare Regressionsgleichung
ESMR	Elektro-, Steuerungs-, Mess- und Regelungstechnik
EW	Einwohnerwert
EGW	Einwohnergleichwert
EZB	Europäische Zentralbank
Fu	Fusion
GemHVO-Doppik	Gemeindehaushaltsverordnung (Landesrecht)
GG	Grundgesetz
GK	Kläranlagen Größenklasse
GuV	Gewinn- und Verlustrechnung
HGB	Handelsgesetzbuch

Abkürzung	Bedeutung
IBRD	International Bank for Reconstruction and Development
IFI	International Financial Institution
IWA	International Water Association
KA	Kläranlage
KAG	Kommunalabgabengesetz
KKA	Kleinkläranlage
Ko	Kooperation
KWG	Kreditwesengesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LAiV	Landesamt für innere Verwaltung
LAWA	Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LCA	Life-Cycle-Assessment
LUNG	Landesamt für Umwelt, Natur und Geologie
LWG	Landeswassergesetz
MA	Moving Average (deutsch: Gleitender Mittelwert)
MBR	Membranbioreaktoren
MEIL	Ministerium für Energie, Infrastruktur und Landesentwicklung von M-V
MC	Monte-Carlo
MCS	Monte-Carlo-Simulation
MLU	Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt (Sachsen-Anhalt)
MT	Maschinentechnik
M-V	Mecklenburg - Vorpommern
NARX	Nonlinear Autoregressive Exogenous
NASS	Neuartige Sanitärsysteme
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPP	Öffentlich-Private-Partnerschaft (engl. Public Private Partnership - PPP)
PAS	Performance Assessment System
PAO	Phosphor akkumulierende Organismen
PCA	Principal Component Analysis (deutsch: Hauptkomponentenanalyse)
PCL	Partial Least Squares
PI	Performance-Indikatoren
PIS	Performance Indicator System
PMS	Performance Measurement System
PKA	Pflanzenkläranlage
PKB	Pro-Kopf-Belastung
RTK	Rotationstauchkörper
RWE	Regenwasserentsorgung
PWK	Pumpwerk
SBR	Sequencing Batch Reactor
SD	System Dynamics (Deutsch: Systemdynamik)
SES	Schmutzwasserentsorgungssystem
SH	Single-Haushalt
SIB	Social Impact Bond
StatA M-V	Statistisches Landesamt Mecklenburg-Vorpommern
SÜVO	Selbstüberwachungsverordnung

Abkürzung	Bedeutung
SVZ	Schlammverwertungszentrum
SWE	Schmutzwasserentsorgung
SWEN	Schmutzwasserentsorgungsnetz
SWW	Siedlungswasserwirtschaft
Sz	Szenario
Sz 0	Nullszenario
Sz I	Positivszenario
Sz II	Realszenario
Sz III	Negativszenario
ThOD	Theoretical Oxygen Demand (Deutsch: theoretischer Sauerstoffbedarf)
TKA	Teichkläranlage
TS	Trockensubstanz
TWV	Trinkwasserversorgung
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
US EPA	United States Environmental Protection Agency
VPI	Verbraucherpreisindex
VK	Vorklärung
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WW	Wasserwirtschaft
ZPH	Zwei-Personen-Haushalt
ZK	Zustandsklasse

## Symbolverzeichnis

### Lateinische Buchstaben

#### Großbuchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	(-)	Alterungsvektor
A <sub>FM,X</sub>	(-)	Anteil eingesetztes Fällmittel
A <sub>G</sub>	(m <sup>2</sup> )	Grundstücksbezogener Bemessungsmaßstab
AHK <sub>KA,Ges</sub>	(€)	Anschaffungs- und Herstellungskosten KA
AHK <sub>SWEN,Ges</sub>	(€)	Anschaffungs- und Herstellungskosten SWEN
B	(-)	Ausfallvektor
B <sub>A</sub>	(€)	Auflösungssumme Beiträge
B <sub>E</sub>	(€)	Beitragserhebung
B <sub>Ges</sub>	(€)	Beitragssumme
B <sub>RBW</sub>	(€)	Restbuchwert Beitragssumme
B <sub>S</sub>	€ m <sup>-2</sup>	Beitragssatz
B <sub>X,E,ZV</sub>	(kg d <sup>-1</sup> E <sup>-1</sup> )	E-spezif. Stofffracht Zulauf VK
B <sub>X,EGW,ZV</sub>	(kg d <sup>-1</sup> EGW <sup>-1</sup> )	EGW-spezif. Stofffracht Zulauf VK
B <sub>JKF</sub>	(-)	Bezugsjahr Kostenfunktion
B <sub>JProg</sub>	(-)	Bezugsjahr Prognose
C	(-)	Resistenzzeitvektor
C <sub>CSB,AN</sub>	(mg l <sup>-1</sup> )	CSB-Schwellen- oder Ablaufkonzentration
C <sub>CSB,ZB</sub>	(mg l <sup>-1</sup> )	CSB-Zulaufkonzentration Belebung
C <sub>N,AN</sub>	(mg l <sup>-1</sup> )	N-Schwellen- oder Ablaufkonzentration
C <sub>N,ZB</sub>	(mg l <sup>-1</sup> )	N-Zulaufkonzentration Belebung
C <sub>P,AN</sub>	(mg l <sup>-1</sup> )	P-Schwellen- oder Ablaufkonzentration
C <sub>P,ZB</sub>	(mg l <sup>-1</sup> )	P-Zulaufkonzentration Belebung
C <sub>X,ZV</sub>	(mg l <sup>-1</sup> )	Stoffkonzentration Zulauf Vorklärung
E <sub>el,E</sub>	(kWh)	Erzeugte elektrische Energie
E <sub>el,eE</sub>	(kWh)	Elektrischer Energiebezug (extern)
E <sub>el,E,zusKA</sub>	(kWh)	Erzeugte elektr. Energie aus Schlämmen zusätzl. KA
E <sub>el,E,CS</sub>	(kWh)	Erzeugte elektrische Energie Co-Substrate
E <sub>el,E,SVZ</sub>	(kWh)	Erzeugung elektrischer Energie SVZ
E <sub>el,EW,ZA</sub>	(kWh)	EW-spezif. elektr. Energieverbrauch Faulgasnutzungsanlage
E <sub>el,KA,Verbr</sub>	(kWh)	Elektrischer Energieverbrauch KA
E <sub>el,NE</sub>	(kWh)	Netzeinspeisung elektrischer Energie
E <sub>el,SVZ,Verbr</sub>	(kWh)	Verbrauch elektrischer Energie SVZ
E <sub>el,Verbr</sub>	(kWh a <sup>-1</sup> )	Elektrischer Energieverbrauch
E <sub>el,spez,KA</sub>	(kWh EW <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	EW-spezif. elektrischer Energieverbrauch
E <sub>th,E</sub>	(kWh)	Erzeugte thermische Energie
E <sub>th,E,SVZ</sub>	(kWh)	Erzeugung thermischer Energie SVZ
E <sub>th,EW,ZA</sub>	(kWh)	EW-spezif. therm. Energieverbrauch Faulgasnutzungsanlage
E <sub>th,NE</sub>	(kWh)	Einspeisung thermischer Energie
E <sub>th,SVZ,Verbr</sub>	(kWh)	Verbrauch thermischer Energie SVZ
E <sub>th,Verbr</sub>	(kWh)	Thermischer Energieverbrauch

Symbol	Einheit	Bedeutung
$Er_{GG}$	(€)	Ertrag Grundgebühr
$Er_{NE}$	(€)	Erträge Netzeinspeisungen
$F_{SE}$	(-)	Überschreitungs faktor Schadeinheit
$FöM_A$	(€)	Auflösungsbetrag Fördermittel
$FöM_{Ges}$	(€)	Fördermittelsumme gesamt
$FöM_{KA}$	(€)	Fördermittel KA
$FöM_{KA,Ges}$	(€)	Fördermittelsumme KA gesamt
$FöM_{Kan}$	(€)	Fördermittel Kanalnetz
$FöM_{Kan,Ges}$	(€)	Fördermittelsumme Kanalnetz gesamt
$FöM_{Kan,AK}$	(€)	Fördermittelsumme Kanalnetz nach Altersklasse
$FöM_{Kan,RW,AK}$	(€)	Restwert nicht verrechneter Fördermittel Kanalnetz
$FöM_{RW}$	(€)	Restwert Fördermittel
$G_{GG}$	(€ BM <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Grundgebührensatz
$G_{MG}$	(€ m <sup>-3</sup> )	Mengengebühr
$G_X$	(€)	Gehaltsanpassung je Kostenstelle
$H_{mano}$	(m)	Manometrische Förderhöhe
$H_{\eta CH4}$	(kWh m <sup>-3</sup> )	Heizwert Methangehalt
HMW	(mg l <sup>-1</sup> )	Höchstes Messergebnis Veranlagungszeitraum
$I_t$	(-)	Irreguläre Komponente
JSM	(m <sup>3</sup> )	Jahresschmutzwassermenge
$K_A$	(€)	Abschreibungen (gesamt)
$K_{A,KA}$	(€)	Abschreibung KA
$K_{A,KAn}$	(€)	Abschreibung KA-Komponenten
$K_{A,Kan}$	(€)	Abschreibung Kanalnetz
$K_{A,KanNeu}$	(€)	Abschreibung Neuerschließungen
$K_{A,KanSan}$	(€)	Abschreibung Kanalerneuerungen und -renovierung
$K_{A,V}$	(€)	Abschreibung Kostenstelle Verwaltung
$K_{A,V,SW}$	(€)	Abschreibung Verwaltungssachanlagewerte
$K_{AA,KAn}$	(€)	Ablösung Abschreibung KA-Komponenten
$K_{AA,Kan}$	(€)	Ablösung Abschreibung Kanalnetz
$K_{AA,KanSan}$	(€)	Ablösung Abschreibung Kanalsanierungen
$K_{AA,V,SW}$	(€)	Ablösung Abschreibung Verwaltungssachanlagewerte
$K_{AbwA}$	(€)	Abwasserabgabe
$K_{At}$	(-)	Kostenanteil
$K_B$	(€)	Betriebsstoffe
$K_{B,UK}$	(€)	Unberücksichtigte Kosten Betriebsstoffe
$K_{ED,Neu}$	(€)	Investitionskosten Klärschlammeindicker
$K_{EKZ}$	(€)	Eigenkapitalzinsen
$K_{En,el}$	(€)	Kosten elektrischer Energiebezug
$K_{FM}$	(€)	Fällmittelkosten
$K_G$	(€)	Gebührenwirksame Kosten
$K_{Ges}$	(€)	Gesamtkosten
$K_{KA,Alt}$	(€)	Anschaffungs-/Herstellungskosten KA
$K_{KA,KF}$	(€)	Investitionskosten KA aus Kostenfunktion
$K_{KA,Neu}$	(€)	Investitionskosten KA

Symbol	Einheit	Bedeutung
$K_{KA,Reinvest,Diff}$	(€)	Reinvestitionskostenanteil Fortschreibung im Modell
$K_L$	(€)	Bezogene Leistungen
$K_{LAB}$	(€ a <sup>-1</sup> )	Laboranalysekosten KA
$K_M$	(€)	Materialaufwand
$K_{KSE}$	(€)	Klärschlamm Entsorgungskosten
$\bar{K}_{p,B}$	(€ a <sup>-1</sup> )	Durchschnittliche Personalkosten Behandlungsanlagen
$K_{p,Ges}$	(€)	Personalkostengesamt
$K_{p,KA}$	(€)	Personalkosten Kostenstelle Behandlungsanlagen
$K_{p,KAn}$	(€)	Personalkosten je KA
$K_{p,KA,Ges,Fu}$	(€)	Personalkosten Kostenstelle Behandlungsanlagen fus. AT
$K_{p,Kan}$	(€)	Personalkosten Kostenstelle Kanalnetz
$K_{p,Kan,Fu}$	(€)	Personalkosten Kostenstelle Behandlungsanlagen fus. AT
$K_{p,MA,X}$	(€)	Personalkostenveränderung durch Mitarbeiterzahl
$K_{p,V}$	(€)	Personalkosten Verwaltung
$K_{p,V,Ag}$	(€)	Personalkosten Verwaltung Zusammenschluss
$K_{p,V,Fu}$	(€)	Personalkosten Verwaltung neuer AT
$K_{p,V,Ko}$	(€)	Personalkosten Verwaltung Kooperation
$K_{p,X}$	(€)	Personalkosten je Kostenstelle
$\bar{K}_{p,X}$	(€)	Durchschnittliches Gehalt pro Mitarbeiter in Kostenstelle
$K_{Rein,Ges}$	(€)	Kanalreinigungskosten
$K_{Rep,Ges}$	(€)	Gesamtkosten Kanalreparatur
$K_{SVZ,Aus}$	(€)	Investitionskosten Ausbau vorh. Faulgasnutzungsanlage
$K_{SVZ,Neu}$	(€)	Investitionskosten Neubau Faulgasnutzungsanlage
$K_{ÜL}$	(-)	Anzahl Kombinationen Überleitungen
$K_{V,SW}$		Sachanlagewerte Verwaltung
$K_Z$	(€)	Zinsaufwand (gesamt)
$K_{Z,FöM,KA}$	(€)	Zinsaufwand Refinanzierung geförderter KA
$K_{Z,FöM,Kan}$	(€)	Zinsaufwand Refinanzierung geförderter Leitungen
$K_{Z,KA}$	(€)	Zinsaufwand Kostenstelle Behandlungsanlagen
$K_{Z,KAn}$	(€)	Zinsaufwand KA-Komponenten
$K_{Z,Kan}$	(€)	Zinsaufwand Kostenstelle Kanalnetz
$K_{Z,KanNeu}$	(€)	Zinsaufwand Neuerschließungen
$K_{Z,KanSan}$	(€)	Zinsaufwand Kanalerneuerung bzw. -sanierung
$K_{Z,V}$	(€)	Zinsaufwand Kostenstelle Verwaltung
$K_{Z,V,SW}$	(€)	Zinsaufwand Investitionen Sachanlagewerte Verwaltung
$K_{ZA,KAn}$	(€)	Zinsablösung KA-Komponenten
$K_{ZA,Kan}$	(€)	Zinsablösung Kostenstelle Kanalnetz
$K_{ZA,V,SW}$	(€)	Zinsablösung Investitionen Sachanlagewerte Verwaltung
$K_{ZusA}$	(€)	Investitionskosten Zusatzanlagen (gesamt)
$K_{ZusA,SVZ}$	(€)	Investitionskosten Zusatzanlagen SVZ-Standort
$K_{ZusA,zusKA}$	(€)	Investitionskosten Zusatzanlagen integrierter KA
$K_{sAw}$	(€)	Sonstige Aufwendungen
$K_{sAw,fix}$	(€)	Fixkostenanteil sonstige Aufwendungen
$K_{sAw,var}$	(€)	Variabler Kostenanteil sonstige Aufwendungen

Symbol	Einheit	Bedeutung
$K_{x,KF}$	(€)	Kostenfunktion KA-Komponenten
KI	(-)	Konfidenzintervall
$Kr_{Ges}$	(€)	Verbindlichkeiten
$L_{AK}$	(m)	Leitungslängen in Altersklassen
$\Delta L_{AK,56}$	(m)	Übergang von AK 5 (<50 a) zu AK 6 (>50 a)
$L_{Ges}$	(km)	Gesamtlänge SWEN
$L_{KanSanAK}$	(km)	Leitungslänge Erneuerung bzw. Sanierung AK
$L_{KanSanZK}$	(km)	Leitungslänge Erneuerung bzw. Sanierung ZK
$L_{ÜL}$	(m)	Überleitungslänge
$L_{ZK}$	(km)	Kanalleitungslängen ZK
$M_{CS}$	(kg TS d <sup>-1</sup> )	Trockensubstanzmasse Co-Substrat
$M_{S,Ges,d}$	(kg TS d <sup>-1</sup> )	Masse Gesamtschlammmenge
$M_{S,zus}$	(kg TS d <sup>-1</sup> )	Masse Trockensubstanzmenge anderer KA
$M_{S,VK}$	(kg TS d <sup>-1</sup> )	Schlammanfall VK (Primärschlamm)
$M_{oTS}$	(kg oTS d <sup>-1</sup> )	Masse Organische Trockensubstanz
$M_{oTS,RS}$	(kg oTS d <sup>-1</sup> )	Masse Organische Trockensubstanz Rohschlamm
MA	(-)	Gleitender Mittelwert
ME	(kg)	Messeinheit
MwSt	(-)	Mehrwertsteuer
N	(-)	Stichprobenumfang, Gesamtmenge
$N_{AS,Ges}$	(-)	Anzahl Einleiter/ Anschlüsse
$N_E$	(E)	Anzahl Einwohner
$N_{E,Bev}$	(E)	Veränderung Bevölkerungszahl
$N_{EGW}$	(EGW)	Anzahl Einwohnergleichwerte
$N_{EGW,IG}$	(EGW)	Veränderung Gewerbe und Industrie
$N_{EW,bAg}$	(EW)	Einwohnerwerte betrachteter Aufgabenträger
$N_{EW,Ges,Ag}$	(EW)	Einwohnerwerte aller Aufgabenträger Zusammenschluss
$N_{EW,KA}$	(EW)	Anzahl Einwohnerwerte KA
$N_{EW,KA,Dim}$	(EW)	Ausbaugröße KA
$N_{EW,KA,Nom}$	(EW)	Nominale Auslastung KA
$N_{EW,SVZ}$	(EW)	Einwohnerwerte SVZ
$N_{EW,zugKA}$	(EW)	Einwohnerwerte SVZ zugehörige KA
$N_{MA,X}$	(-)	Mitarbeiterzahl Kostenstelle
$P_{FM,Al}$	(€ kg <sup>-1</sup> Al <sup>-1</sup> )	Preis Aluminium-Fällmittel
$P_{FM,Fe}$	(€ kg <sup>-1</sup> Fe <sup>-1</sup> )	Preis Eisen-Fällmittel
$P_{Pump}$	(kWh)	Jahresförderleistung Pumpstation
$P_{kWh}$	(€ kWh <sup>-1</sup> )	Energiepreis
$P_{kWh,NE}$	(€ kWh <sup>-1</sup> )	Vergütungspreis Netzeinspeisung
$P_x$	(-)	Ergebnisausgabe
$PKB_{ZPH}$	(€ a <sup>-1</sup> )	Pro-Kopf-Belastung Zwei-Personen-Haushalt
$Q_{IG}$	(m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	Veränderung Abflussmenge Gewerbe und Industrie
$Q_{SW,a}$	(m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> )	Jahresschmutzwassermenge
$Q_{wv,E}$	(m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	Häusliche Wasserverbrauchsveränderung
$Q_a$	(m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> )	Jahresabwassermenge
$Q_{d,E}$	(m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	Abwassermenge Haushalte



Symbol	Einheit	Bedeutung
$Q_{d,EGW}$	$(m^3 d^{-1})$	Wasserverbrauchsveränderung Gewerbe und Industrie
$R$	$(-)$	Überlebensfunktion der Kohorten
$RP_{Bev}$	$(-)$	Rahmenparameter Bevölkerung
$RP_{GI}$	$(-)$	Rahmenparameter Gewerbe & Industrie
$RP_{Inf}$	$(-)$	Rahmenparameter Inflation
$RP_{WV}$	$(-)$	Rahmenparameter Wasserverbrauch
$RP_{Zins}$	$(-)$	Rahmenparameter Zinssatz
$Re$	$(-)$	Reynolds-Zahl
$RBW_{KA}$	$(€)$	Restbuchwerte KA
$RBW_{SWEN}$	$(€)$	Restbuchwerte SWEN
$S_n$	$(-)$	Teilsomme Zufallsvariablen
$S_t$	$(-)$	Saisonale Komponente
$SE$	$(-)$	Summe Schadeinheiten Entsorgungsgebiet
$SE_{CSB}$	$(-)$	CSB Schadeinheiten KA
$SE_{Erhöhung}$	$(-)$	Schadeinheitserhöhung
$SE_N$	$(-)$	N Schadeinheiten KA
$SE_P$	$(-)$	P Schadeinheiten KA
$SE_X$	$(-)$	Schadstoff-Schadeinheit (CSB, P, N)
$T_t$	$(-)$	Trendkomponente
$TS_{Ent,PS}$	$(\%)$	Trockensubstanzgehalt entwässerter Primärschlammes
$TS_{Ent,ÜS}$	$(\%)$	Trockensubstanzgehalt entwässerter Überschussschlammes
$ÜS_d$	$(kg TS d^{-1})$	Schlammproduktion Biologie (Sekundärschlamm)
$ÜS_{d,C}$	$(kg)$	Schlammproduktion Kohlenstoffelimination
$ÜS_{d,P}$	$(kg)$	Schlammproduktion Phosphorelimination
$ÜW_X$	$(kg m^{-3})$	Schadstoff-Überwachungswert (CSB, P, N)
$V_{Gas,CS}$	$(N m^3 d^{-1})$	Gasertrag Co-Substrat
$V_{Gas,Ges}$	$(N m^3 d^{-1})$	Gasertrag (gesamt)
$V_{Gas,RS}$	$(N m^3 d^{-1})$	Gasertrag Rohschlamm
$V_{Gas,spez}$	$(l kg^{-1} oTS^{-1})$	Spezifischer Faulgasanfall
$V_{Gas,zusKA}$	$(N m^3 d^{-1})$	Gasertrag Schlämme zusätzl. KA
$V_{KS,Ent}$	$(m^3)$	Schlamm Entsorgungsmenge
$X_{anorgTS,ZB}$	$(mg l^{-1})$	Konzentration abfiltrierb. anorgan. TS Zulauf Belebung
$X_{CSB,BM}$	$(mg l^{-1})$	Konzentration des CSB der Biomasse
$X_{CSB,inert,BM}$	$(mg l^{-1})$	Konzentration des inerten Anteils des CSB der Biomasse
$X_{CSB,inert,ZB}$	$(mg l^{-1})$	Konzentration des inerten Anteils des CSB im Zulauf
$X_{CSB,ÜS}$	$(mg l^{-1})$	Konzentration partikul. CSB im Überschussschlamm
$\bar{X}_m$	$(-)$	MC-Schätzer
$X_{P,BM}$	$(mg l^{-1})$	P eingebaut in Biomasse
$X_{P,BioP}$	$(mg l^{-1})$	Bio-P biologisch gebundener Phosphor
$X_{P,Fäll}$	$(kg Fe)$	Fällmittelbedarf
$X_{P,Fäll,Al}$	$(mg l^{-1})$	Fällmittelbedarf Al
$X_{P,Fäll,Fe}$	$(mg l^{-1})$	Fällmittelbedarf Fe
$X_{P,Fäll,X}$	$(mg l^{-1})$	Fällmittelmenge
$X_{TS,ZV}$	$(mg l^{-1})$	Konzentration TS Zulauf VK
$Y_{ds}$	$(a^{-1})$	Desaisonalisierung

Symbol	Einheit	Bedeutung
$Y_P$	(-)	Schätzwert
$\bar{Y}_P$	(-)	Mittelwert vom Schätzwert
$Y_t$	(-)	Daten aus der Zeitreihe
$ZA_{KA}$	(h a <sup>-1</sup> )	Zeitaufwand Untersuchungen und Wartung nach SÜVO
$ZA_{KA,voll}$	(h a <sup>-1</sup> )	Normalarbeitszeit pro Person und Jahr

#### Kleinbuchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
d	(m)	Rohrinnendurchmesser (Rohrinnenweite)
df	(-)	Freiheitsgrad
$f_{B,var}$	(-)	Faktor mengenbeeinflusster Anteil Betriebsstoffe
$f_{FT}$	(-)	Kapazitäts- / Auslastungsfaktor Faulung
$f_{Kosten,ZK}$	(-)	Kostenfaktor ZK
$f_{L,var}$	(-)	Faktor mengenbeeinflusster Anteil bezogener Leistungen
$f_{MB}$	(-)	Mengenbeeinflussungsfaktor
$f_{sAw,fix}$	(-)	Fixkostenanteilsfaktor sonstige Aufwendungen
$f_{sAw,var}$	(-)	Faktor variabler Kostenanteil sonstige Aufwendungen
$h_v$	(m)	Verluthöhe
k	(m)	Rohrrauigkeit
$k_{ED,KF}$	(€ EW <sup>-1</sup> )	Einwohnerspezifische Investitionskosten Klärschlammeindicker
$k_{FT,KF}$	(€ EW <sup>-1</sup> )	Einwohnerspezifische Investitionskosten Faulturm
$k_{kanNeu,spez}$	(€)	Längenspezifische Kanalneuerschließungskosten
$k_{kanSan,spez}$	(€ m <sup>-1</sup> )	Längenspezifische Kanalsanierungskosten
$k_{pump}$	(€ l <sup>-1</sup> s m <sup>-1</sup> )	Spezifische Kosten PWK
$k_{Rein}$	(€ km <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Längenspezifische Reinigungskosten
$k_{Rep}$	(€ km <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Längenspezifische Reparaturkosten
$k_{SVZ,KF}$	(€ EW <sup>-1</sup> )	EW-spezif. Gesamtinvestitionskosten Faulgasnutzungsanlage
$k_{VK,KF}$	(€ EW <sup>-1</sup> )	EW-spezif. Investitionskosten Vorklämung
$\bar{k}_U$	(€)	Durchschnittliche Kosten Untersuchungsparameter
m	(-)	Anstieg ELRG
$n_{AK}$	(-)	Gesamtanzahl der AK
$n_{para}$	(-)	Anzahl zu untersuchender Parameter
$n_U$	(a <sup>-1</sup> )	Untersuchungshäufigkeit
$n_y$	(-)	Schnittpunkt ELRG
$n_{ZV}$	(-)	Anzahl Zufallsvariablen
$p_{KA,x}$	(-)	Baukomponentenanteil (BT, MT, ESMR)
$p_{VK,oTS}$	(-)	Anteil oTS VK
$r_{EKZ}$	(-)	Eigenkapitalzinssatz
$r_{Einspar,sAw}$	(-)	Einsparrate sonstige Aufwendungen
$r_{Einspar,B}$	(-)	Einsparrate Betriebsstoffe
$r_{Einspar,L}$	(-)	Einsparrate bezogene Leistungen
$r_G$	(-)	Gehaltsanpassungsrate
$r_{Inf}$	(-)	Inflationsrate
$r_{Inf,En}$	(-)	Energiepreissteigerungsrate
$r_{Inf,VB}$	(-)	Inflationsrate vor Betrachtungszeitraum

Symbol	Einheit	Bedeutung
$r_{\text{Kan,Neu}}$	(-)	Neuerschließungsquote
$r_{\text{KanRein}}$	(-)	Kanalreinigungsrage
$r_{\text{KanSan}}$	(-)	Kanalsanierungsquote (Erneuerung und Renovierung)
$r_{\text{Qa,EW}}$	(-)	Veränderungsrate häusliche und industrielle Abwassermenge
$r_{\text{SW}}$	(-)	Veränderungsrate Schmutzwassermenge
$r_{\text{WV}}$	(-)	Veränderungsrate häuslicher Wasserverbrauch
$r_z$	(-)	Kreditzinssatz
$r_{z,\text{VB}}$	(-)	Kreditzinssatz vor Betrachtungszeitraum
$s_{\text{HW}}$	(km)	Strecke zwischen Hochwerten
$s_{\text{RW}}$	(km)	Strecke zwischen Rechtswerten
$t_{\text{BA}}$	(-)	Zeitraum Beitragsauflösung
$t_{\text{KA}}$	(-)	Baujahr
$t_{\text{KA,A}}$	(a)	KA-Alter
$t_{\text{Kan}}$	(a)	Mittleres Alter SWEN
$t_{\text{ND,KA}}$	(a)	Nutzungsdauer Kläranlagenkomponenten
$t_{\text{ND,KanNeu}}$	(a)	Nutzungsdauer neuer Leitungen
$t_{\text{ND,KanSan}}$	(a)	Nutzungsdauer erneuerter und sanierter Leitungen
$t_{\text{ND,V,SW}}$	(a)	Nutzungsdauer Sachanlagewerte
$t_{\text{FöM}}$	(-)	Zeitraum Auflösung Fördermittel
$\bar{t}_{\text{V,SW}}$	(a)	Durchschnittliches Sachanlagenalter
$v$	(m s <sup>-1</sup> )	Fließgeschwindigkeit
$z$	(-)	Standardisierte Zufallsvariable (Konfidenzoeffizient)

### Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	(-)	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\eta_{\text{BHKW,eI}}$	(-)	Elektrischer Gesamtwirkungsgrad BHKW
$\eta_{\text{BHKW,th}}$	(-)	Thermische Gesamtwirkungsgrad BHKW
$\eta_{\text{Pump}}$	(-)	Wirkungsgrad Pumpe
$\eta_{\text{SR,PS}}$	(-)	Schlammreduktion oTS-Abbau Primärschlamm
$\eta_{\text{SR,ÜS}}$	(-)	Schlammreduktion oTS-Abbau Überschussschlamm
$\eta_{\text{VK}}$	(-)	Abscheideleistung Vorklärung
$\eta_{\text{VK,oTS}}$	(-)	Abscheideleistung Vorklärung oTS
$\lambda$	(-)	Rohrreibungszahl
$\mu$	(-)	Erwartungswert
$\xi$	(-)	Wahrscheinlichkeitsmaß
$\rho$	(kg m <sup>-3</sup> )	Dichte
$\sigma$	(-)	Standardabweichung
$\Phi$	(-)	Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

### Konstanten

Symbol	Einheit	Wert	Bedeutung
$e$	(-)	$\approx 2,718$	Eulersche Zahl
$g$	(m s <sup>-2</sup> )	9,81	Gewichtskraft
$\rho_{\text{W}}$	(kg m <sup>-3</sup> )	$\approx 1000$	Dichte Wasser
$\nu_{\text{W}}$	(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$\approx 10^{-6}$	Kinematische Viskosität Wasser

**Laufvariablen**

Symbol	Bedeutung
i, n	Laufvariablen Stückmengen (Anteil einer Gesamtheit)
$n_i$	Inverse Laufvariable (Zähler)
t	Zeitlaufvariable

**Mathematische Operatoren und Symbole**

Symbol	Bedeutung
nint	Matlab® Funktion: Nearest Integer
randn	Matlab® Funktion: Erzeugung von normalverteilten Zufallsvariablen
$\Sigma$	Summe
$\bar{O}$	Arithmetischer Mittelwert
$\Delta$	Differenz
$\ni$	Element von/ enthalten in
$\neg$	Nicht
$\wedge$	Und
$\vee$	Oder

**Abkürzungen für die Beschreibung von Wenn-Bedingungen**

Symbol	Bedeutung
BB	Konventionelle KA mit Belebungsbecken
ND	Nutzungsdauer
PG	Prüfgröße
PKA	Pflanzenkläranlage
RTK	Rotations- und Scheibentauchkörper
SBR	Sequencing Batch Reaktor
SF	Schlammfaulung
SS	Art der Schlammstabilisierung
TG	Testgröße
TKA <sub>u</sub>	Teichkläranlage (unbelüftet)
TKA <sub>b</sub>	Teichkläranlage (belüftet)
VT	Verfahrenstechnik
WBNW	Wiederbeschaffungsneuwert



### 1. Einleitung

#### 1.1 Veranlassung

Der demografische Wandel in Deutschland führt zu einer im Durchschnitt älter werdenden Gesellschaft. Grund dafür sind die niedrige Geburtenrate und der Anstieg der Lebenserwartungen. Durch Zuwanderung kann dieser Effekt zwar abgemildert aber nicht gestoppt werden, das legen zumindest die aktuellsten Zahlen des Statistischen Bundesamtes nahe. Ausgehend vom Jahr 2018 wird sich gemäß der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Bundes und der Länder die Bevölkerung bei gleichbleibender Lebenserwartung und Geburtenrate, bei einem schwächeren Wanderungssaldo (Wanderungssaldo 147.000 Personen im Jahr) bis 2060 voraussichtlich um 10 % reduzieren. Bei einer Verdoppelung des Wanderungssaldos (Wanderungssaldo 311.000 Personen im Jahr) würde die Bevölkerungszahl bis 2060 konstant bleiben. Dabei gestaltet sich die Bevölkerungsentwicklung in den einzelnen Bundesländern stark unterschiedlich, mit einem starken Gefälle zwischen den alten und neuen Bundesländern. In Abhängigkeit vom Wanderungssaldo verändert sich die Bevölkerungszahl in den Bundesländern bis 2060 bei einem schwächeren Wanderungssaldo von -29 % (Sachsen-Anhalt) bis 5 % (Hamburg) und bei einem stärkeren Wanderungssaldo von -22 % bis 18 % (StatBA 2019). Zudem ist die Bevölkerungsentwicklung stark regional und räumlich geprägt. Besonders stark wird die Veränderung die ländlichen Regionen treffen, während der städtische Raum durch Zuzüge den Bevölkerungsrückgang abmildern kann. Auch wenn der demografische Wandel medial nicht mehr präsent ist, so ist er dennoch allgegenwärtig und wirkt sich langfristig u.a. auf die Systeme der Abwasserwirtschaft in schrumpfenden Regionen und damit auf die dort zu entrichtenden Gebühren bzw. Entgelte aus.

Generell sind die betrieblichen Auswirkungen auf die Abwassersysteme beherrschbar. Durch die Abnahme der Bevölkerungszahl verringert sich der Schmutzwasseranfall der Haushalte und führt zu einer Erhöhung des Ablagerungsrisikos, insbesondere bei den Anfangshaltungen von Freigefälleleitungen. Dies führt zu höheren Betriebskosten für die Kanalreinigung. Im Vergleich dazu sinken die Betriebskosten der Kläranlagen (KA) aufgrund der Verringerung des Energieverbrauchs, Fällungs- und Flockungsmittel sowie weiterer Betriebsstoffe (Tränckner 2013). Die Kosten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe machen bei deutschen Abwasserentsorgern im Durchschnitt 11 % (DWA 2014) der Gesamtkosten aus, weshalb demografisch bedingte Veränderungen dieser Kosten keine Gebührentreiber sind. Ein Großteil der Gesamtkosten entfällt auf die Personalkosten mit 19 % und auf die Kapitalkosten der Sachanlagenwerte mit 45 %. Aufgrund der langen technischen Nutzungsdauern abwasserwirtschaftlicher Systeme (z.B. 25 Jahre für die Maschinenteknik von Behandlungsanlagen, 50 Jahre für Betonbauwerke von Behandlungsanlagen und 50 bis 80 Jahre für Kanalnetze) sind flexible sowie kurz- bis mittelfristige Kapitalkostensenkungen nicht umsetzbar. In Anbetracht des mittel- bis langfristigen Handlungszeitraumes zur Beeinflussung des hohen Kostenanteils, führt eine im gleichen Zeitraum schrumpfende Bevölkerung zu einer Umverteilung der Kosten auf die übrigen an das Abwassersystem angeschlossenen Haushalte und damit zur Gebührensteigerung (Nowack et al. 2010, Steenbock 2014, UBA 2010). Inflationsbedingte Gehaltsanpassungen bei den Personalkosten und Kostensteigerungen im Bereich der Materialkosten und sonstigen Aufwendungen verstärken den

Gebührenanstieg zusätzlich. Bei den Kapitalkosten wirken sich Zinssatzsteigerungen und Inflation jedoch erst zum Zeitpunkt der Reinvestition des jeweiligen Sachanlagenwertes aus. Demnach wird die zukünftige Gebührenentwicklung durch langfristige Planungen geprägt. In Abhängigkeit von wirtschaftlichen sowie sozioökonomischen Faktoren und dem Bevölkerungsrückgang sind mit Berücksichtigung zukünftiger Rahmenbedingungen bei einem durchschnittlichen Unternehmen der Abwasserwirtschaft in Deutschland inflationsbereinigt Gebührensteigerungen von ca. 51 % (Tränckner 2013) zu erwarten. Dies führt zu einer zunehmenden Netto-Belastung der Haushalte, insbesondere in wirtschaftlich schwachen Regionen mit niedrigen Einkommen, welche auch in Zukunft durch unterproportionale Gehaltsanpassungen hinter der Inflationsentwicklung liegen werden. Im Sinne einer zumutbaren Haushaltsbelastung durch die Abwasserentsorgung können in besonders stark betroffenen Regionen kompensierende Maßnahmen förderlich sein, um die Auswirkungen des Gebührenanstiegs zu begrenzen.

Durch die langen Nutzungsdauern der Abwasseranlagen und die damit verbundenen Kapitalkosten gibt es nur wenige kurzfristige infrastrukturelle Handlungsoptionen zur Eindämmung der durch den Bevölkerungsrückgang verursachten Gebührensteigerungen. Infrastrukturelle Maßnahmen, die vor dem Abschreibungsende umgesetzt werden, wirken sich zusätzlich gebührensteigernd aus. In Anbetracht des eingeschränkten Handlungsrahmens sind alternative Maßnahmen zur kurz- bis mittelfristigen Senkung von Gebühren ggf. umzusetzen. Dabei kann es sich um organisatorische oder finanzwirtschaftliche Anpassungen handeln. Zahlreiche Publikationen sowie erstellte Leitbilder einer zukunftsfähigen Siedlungswasserwirtschaft geben einen umfassenden Überblick über denkbare, alternative als auch progressive Maßnahmen (MLUL 2015, Gießler und Tränckner 2014, Steenbock 2014, Londong et al. 2011, Geßner 2009, Graetz 2008, Klinkenberg 2007, Tegner und Rehberg 2006). Die für einen Aufgabenträger in Betracht kommenden Maßnahmen werden durch viele Faktoren, wie z.B. dessen Gebietsgröße, Siedlungs-, Infra- und Organisationsstruktur, Systemauslastung und -effizienz, Unternehmensform sowie vom Beitragswesen beeinflusst. Für die Ermittlung von relevanten dagegenwirkenden Maßnahmen ist eine vorangegangene, fallkonkrete Analyse der wirtschaftlichen und technischen Entwicklung des Aufgabenträgers und eine anschließende Effizienz- und Potentialanalyse der einzelnen Maßnahmen erforderlich. Es gibt eine Vielzahl von fachspezifischen Modellen mit unterschiedlichen Ansätzen, unterschiedlicher Komplexität und Detaillierungsgrad in der strukturellen Abbildung für Kläranlagen (KA) und Kanalnetze. Der Schwerpunkt dieser Modelle liegt in der qualitativen Abbildung der Prozesse. In Fachprogrammen werden die Parameter dieser Ansätze mit Kosten hinterlegt und dienen als Entscheidungsinstrumente für Strategieentwicklungen und Prozessoptimierungen. Eine unternehmensweite Darstellung der Infra- und Kostenstruktur ist mit diesen Programmen nicht umzusetzen. Unternehmensmodelle für Benchmarking und Effizienzanalysen, die dies gewährleisten, bilden dagegen die kostenrelevanten Prozesse nicht ab, sondern leiten die Kostenveränderung über Kostenfunktionen in Abhängigkeit von Prozessgrößen oder Einwohnerwerten ab. Um die wirtschaftliche und technische Entwicklung eines Aufgabenträgers der Abwasserwirtschaft unter Annahme zukünftiger Rahmenbedingungen abschätzen sowie quantitative Analysen zu Effizienz und Potential objektübergreifender infrastruktureller und organisatorischer Maßnahmen durchführen zu können, bedarf es eines prozessbasierten, gebietsweiten, ganzheitlichen Ansatzes.

### 1.2 Forschungsfragen, Hypothesen und Zielstellung

Zahlreiche Studien enthalten qualitative und quantitative Ergebnisse zu den Auswirkungen des demografischen Wandels auf die abwasserwirtschaftlichen Systeme und sich dadurch ergebende Kosten- und Gebührensteigerungen. Der Fokus dieser Betrachtungen liegt vornehmlich auf der Bevölkerungsreduktion und der altersbedingten Verringerung der Schmutzwassermenge. Dabei wurde dem Einfluss ökonomischer Faktoren auf die Kostenentwicklung nur eine sekundäre Bedeutung zugemessen, in dem diese unter konstanten Rahmenbedingungen untersucht worden sind. Zudem sind die getroffenen Annahmen seit der Finanzkrise von 2008 und den damit verbundenen Veränderungen im Finanzsektor obsolet, weshalb die festgelegten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen dieser Untersuchungen die gegenwärtige finanzwirtschaftliche Situation nicht repräsentieren. Ein weiteres Defizit dieser Untersuchungen ist die unzureichende Abbildung der Kosten- und Finanzstruktur der Aufgabenträger. Gebührenmindernde Positionen wie die Auflösung der Beiträge und Fördermittel als auch die Refinanzierung von geförderten Sachanlagen wurden nicht berücksichtigt. Aufgrund der Komplexität fand überwiegend eine Darstellung der Gesamtkosten ohne eine Übertragung auf die Gebühren statt. Dadurch bleibt die Umverteilung der Kosten bei einer sich verringern Bevölkerung unbeachtet. Die aus den Berichten und Leitbildern entnommenen Anpassungsmaßnahmen wurden lediglich qualitativ bewertet, quantitative Aussagen erfolgten bei technischen Maßnahmen ausschließlich objektbezogen, eine Bewertung auf Aufgabenträgerebene wurde bisher nicht durchgeführt.

Die bisherigen Untersuchungen mit darin lediglich vorgefundenen Andeutungen von zu erwartenden finanziellen und betriebswirtschaftlichen Auswirkungen, lassen den Bedarf einer gesamtheitlichen Analyse zur wissenschaftlichen Betrachtung erkennen (Hubner 2014). Skaleneffekte im Sinne eines Rollouts von technischen Anpassungsmaßnahmen im gesamten Entsorgungsgebiet eines Aufgabenträgers und die daraus zu generierenden möglichen Einsparungen wurden bisher nicht untersucht. In Anbetracht dieser offenen Untersuchungsschwerpunkte lassen sich folgende Fragen für die thematische Bearbeitung dieser Arbeit ableiten:

- In welchem Ausmaß beeinflusst der demografische Wandel die Gebührenentwicklung tatsächlich und ist die Bevölkerungsreduktion der maßgebende Gebührentreiber? (Sensitivitätsanalyse)
- Bleiben die Gebühren in Anbetracht der für die Zukunft anzunehmenden ökonomischen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen für einen Durchschnittshaushalt in der betrachteten Region zumutbar? (Prognosesimulation)
- Welche Maßnahmen wirken sich langfristig gebührensenkend aus und sind diese ausreichend, um einem starken Gebührenanstieg entgegenzuwirken? (Quantifizierung von Maßnahmeneffekten)

In Bezug auf die aufgestellten Forschungsfragen werden in dieser Arbeit drei zentrale Hypothesen zu Grunde gelegt:



## 1. Einleitung

---

- (1) Im Vergleich aller relevanter Faktoren, welche die Rahmenbedingungen der Schmutzwasserentsorgung ausmachen und als Kostentreiber zu deklarieren sind, ist die durch den Bevölkerungsrückgang bedingte Gebührensteigerung moderat und zu bewältigen.
- (2) Unabhängig vom Bevölkerungsrückgang erscheint ohne entgegenwirkende Maßnahmen ein Gebührenanstieg im Bereich der Schmutzwasserentsorgung unvermeidbar.
- (3) Durch kurz- bis mittelfristige Anpassungsmaßnahmen lässt sich der Gebührenanstieg abmildern, wodurch sich in Zukunft auch in Regionen mit einem starken Bevölkerungsrückgang zumutbare Gebühren erzielen lassen.

Als übergeordnete Zielstellung dieser Arbeit sind die Beantwortung der Forschungsfragen und Bestätigung bzw. Ablehnung der Hypothesen zu benennen. Zur Erfüllung dieses Ziels werden in dieser Arbeit folgende Aufgaben bearbeitet:

- (1) Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes zur unternehmensweiten Abbildung von Aufgabenträgern der Abwasserwirtschaft.

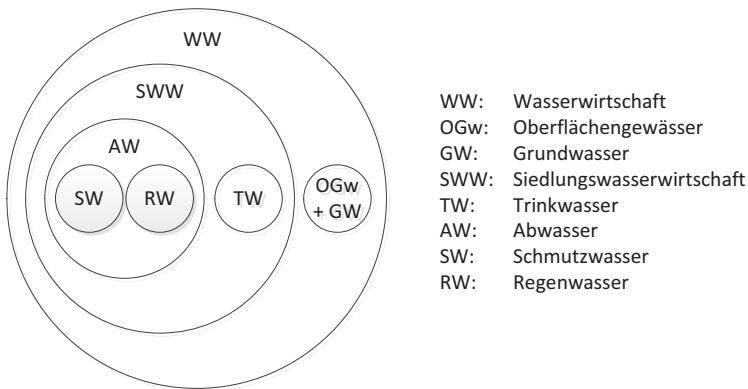
Dieser Ansatz soll alle maßgeblichen technischen und wirtschaftlichen Prozesse des Unternehmens prozessbasiert und in klarer Kausalität zu veränderlichen Randbedingungen beschreiben und zur Verfügung stehende Daten nutzen.

- (2) Durchführung von beispielhaften, fallkonkreten Prognosesimulationen zur Ermittlung der zukünftigen Gebührenentwicklung und einer Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der relevanten Gebührentreiber.
- (3) Bewertung von Gegenmaßnahmen und Ableitung von geeigneten Anpassungsstrategien.

### 1.3 Einordnung und Abgrenzung

Unablässig gibt es für die Wasserwirtschaft zahlreiche Herausforderungen, wie z.B. die Anpassung der wasserwirtschaftlichen Systeme an den Klima- und demografischen Wandel, die mit der Novellierung der Klärschlammverordnung in 2017 einhergehende Steigerung der thermischen Klärschlammmentsorgung sowie das ab spätestens 2029 geforderte Phosphorrecycling sowie der absehbar kommende gesetzliche Rahmen bezüglich der Elimination von Mikroschadstoffen und dem eventuell geforderten Rückhalt von Mikroplastik.

Im Bereich der Wasserwirtschaft gibt es viele sektorale Handlungsfelder, die durch qualitative und quantitative Wechselwirkungen in Beziehung stehen. Die aufgeführten Aufgaben bzw. Herausforderungen lassen sich Handlungsfeldern zuordnen. Durch eine Separation der Handlungsfelder an ihren Systemgrenzen lassen sich der Schwerpunkt der Betrachtung und die verbundenen Herausforderungen thematisch eingrenzen. In Abbildung 1-1 sind in einem Teilmengendiagramm die sektoralen Handlungsfelder der Wasserwirtschaft abgebildet.



**Abbildung 1-1:** Teilmengen der sektoralen Handlungsfelder in der Wasserwirtschaft

Bezogen auf den thematischen Untersuchungsschwerpunkt dieser Arbeit, liegt der Fokus auf den Auswirkungen des Bevölkerungsrückganges durch den demografischen Wandel unter Berücksichtigung von sich überlagernden Rahmenbedingungen. Im Einzelnen zählen dazu wirtschaftliche als auch sozioökonomische Einflussfaktoren. Der wirtschaftliche Rahmen wird durch die Personalkostenentwicklung, Inflationsrate auf Baupreise, Energiepreissteigerung, Preissteigerung auf gewöhnliche Materialien und den Kreditzinssatz definiert. Die Beschreibung der sozioökonomischen Veränderungen erfolgt unter anderem anhand der Neuerschließungsquote, zur Abbildung der sich voraussichtlich verändernden Wohnstrukturen, als auch durch den Wasserverbrauch, welcher sich auf den Schmutzwasseranfall als auch dessen stoffliche Konzentration auswirkt.

Zur Darstellung der thematischen Abgrenzung dieser Arbeit und der Systemgrenze des entwickelten Ansatzes erfolgt eine Segmentierung des Oberbegriffs Abwasserwirtschaft. Gemäß Definition ist Abwasser jegliches durch den menschlichen Gebrauch verändertes Wasser, welches in die Kanalisation gelangt. Demnach setzt sich Abwasser zusammen aus dem Schmutzwasser der Haushalte, Gewerbe und Industrie sowie Regenwasser, welches durch den Oberflächenabfluss in die Kanalisation gelangt. Der Regenwasserabfluss wird beeinflusst durch die Versiegelung von Flächen und meteorologische Einflüsse, u.a. durch den Klimawandel (Zunahme von Starkregen und Trockenwetterphasen). Eine Beeinflussung der Regenwassermengen durch einen Bevölkerungsrückgang existiert in der Regel nicht. Versiegelte Flächen bleiben meist bestehen und werden nur selten zurückgebaut bzw. einer anderen Nutzung zugewiesen. In vielen Regionen ist eher ein gegensätzlicher Trend zu beobachten. Denn obwohl sich in den Kommunen und Gemeinden z.B. in Mecklenburg-Vorpommern (M-V) die Bevölkerungszahlen stetig verringern nimmt die Flächenversiegelung weiterhin zu (Gießler und Tränckner 2014). Zur Fokussierung des thematischen Schwerpunktes und Eingrenzung dieser Arbeit bleiben die Einflüsse auf die Regenwassermengen unberücksichtigt. Durch die gebührenrechtliche Trennung zwischen Schmutzwasser und Regenwasser werden in dieser

Untersuchung ausschließlich die Anlagen, Leitungen und organisatorischen Strukturen der Schmutzwasserentsorgung betrachtet. Dabei handelt es sich um eine rein theoretische Trennung, da physisch die Systeme miteinander verflochten sind und sich gegenseitig beeinflussen. Zur Trennung von Schmutzwasser- und Regenwassersystemen werden in der Betrachtung Mischwasserkanalisationen (Entwässerung von Schmutz- und Regenwasser) anteilig nach dem Gebührenrecht den Sachanlagenwerten zugeordnet. Absehbare relevante technische Erweiterungen von Verfahrensstufen bzw. Anlagenkomponenten, welche die Schmutzwasserentsorgung betreffen könnten, sind für eine Einschätzung der zukünftigen Entwicklung von Bedeutung. Angesichts der umstrittenen gesetzlichen Lage in Bezug auf eine ggf. geforderte Elimination von Mikroschadstoffen und den Rückhalt von Mikroplastik, sind diese thematischen Aspekte nicht Gegenstand dieser Arbeit. Für das Phosphorrecycling existieren unterschiedliche Verfahren, welche gegenwärtig als großtechnische Pilotanlagen umgesetzt und untersucht werden. Anwendungsbezogene Zahlen zu den verfahrenstechnischen Kosten und zur Ertragsmarge, welche sich durch den Verkauf des Phosphors als Dünger ergeben könnte, sind nicht verfügbar. Aus diesem Grund wurde das Phosphorrecycling in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Die thermische Klärschlamm Entsorgung wurde auf Grundlage einer geschätzten Kostenentwicklung durch den für diese Untersuchung betrachteten Aufgabenträger kostenseitig mitberücksichtigt.

Beide Teile der Abwasserentsorgung (Schmutzwasser- und Regenwasserentsorgung) zählen in Deutschland zu den hoheitlichen Kernaufgaben der Gemeinden. Dabei kann die Aufgabenerfüllung durch die Gemeinden selbst in Form von kommunalen Unternehmen (Regiebetrieb, Eigenbetrieb oder Eigengesellschaft) erfolgen oder an Körperschaften des öffentlichen Rechts (Genossenschaften, Zweckverbände) übertragen werden. Zudem sind verschiedene Organisationsformen mit privater Beteiligung (Betriebsführungs-, Betreiber- und Kooperationsmodell) umsetzbar, die Pflicht der Abwasserentsorgung geht auf die beteiligten privatrechtlichen Unternehmen jedoch nicht über. In dieser Arbeit wird unabhängig von den Unternehmensformen verallgemeinernd der Begriff Aufgabenträger verwendet, denn auch durch die Übertragung der Aufgaben bleibt die grundsätzliche Erfüllungspflicht als auch die Beitragskalkulation unberührt. Über eine Veranlagungsrechnung werden die Beiträge den Gemeinden zugewiesen, welche die Kosten entsprechend einer Gebührensatzung an die angeschlossenen Einwohner weitergibt. Grundsätzlich ist die Gebührenerhebung den Gemeinden vorbehalten. Bei der modellhaften Abbildung der Aufgabenträger ist für die Ermittlung der Haushaltsbelastung im entwickelten Ansatz dieser Arbeit die Gebührenkalkulation für die Schmutzwasserentsorgung mit integriert. Statt einer Veranlagungsrechnung für die einzelnen Gemeinden findet die Gebührenberechnung in diesem Ansatz vereinfacht für das gesamte Entsorgungsgebiet statt.

### 1.4 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit einem Überblick von Anpassungsmaßnahmen an den demografischen Wandel im Bereich der Abwasserwirtschaft. Neben infrastrukturellen Maßnahmen werden weitergehende Möglichkeiten der organisatorischen und finanzwirtschaftlichen Anpassung aufgeführt.

Im anschließenden Kapitel 3 erfolgt eine Darstellung zum gegenwärtigen Stand in der Modellierung von Prozessen und Kosten im Bereich der Abwasserwirtschaft, um die Optionen aufzuzeigen, die zur

## 1. Einleitung

---

Prädiktion der zukünftigen Entwicklung der Aufgabenträger als auch zur Quantifizierung von Maßnahmeneffekten zur Verfügung stehen. Die Abbildung der Kostenstruktur von Aufgabenträgern sowie der kostenrelevanten Prozesse der Schmutzwasserentsorgung stehen im Vordergrund dieser Betrachtung. Deshalb werden gängige Kanalalterungsmodelle, KA-Modelle sowie Modelle zur Herleitung von Kosten und zur Abbildung der Kostenstruktur vorgestellt. Auf Basis dieses Überblickes wird der Bedarf eines ganzheitlichen Ansatzes zur Abbildung der Infra- und Kostenstruktur auf Entsorgungsgebietsebene für Aufgabenträger im Bereich der Schmutzwasserentsorgung geäußert.

Basierend auf dem Bedarf eines Ansatzes findet in Kapitel 4 eine ausführliche Beschreibung zur Konzeption und Entwicklung eines ganzheitlichen prozessbasierten Modells statt. Hierfür werden in einem ersten Schritt, zur Beschreibung des zukünftigen wirtschaftlichen und sozioökonomischen Umfeldes, die maßgebenden Einflussfaktoren auf die technischen Systeme und Kosten der Schmutzwasserentsorgung benannt, welche in dieser Arbeit als Rahmenparameter bezeichnet werden. Die Rahmenparameter sind die Grundlage für die Konzeption von Szenarien und sind der Ausgangspunkt der prädiktiven Betrachtung eines Aufgabenträgers im entwickelten Modell. Für die Generierung von repräsentativen Prognoseergebnissen erfolgte eine Analyse von Langzeitreihen der einzelnen Rahmenparameter mittels Zeitreihenmodellen, um die Spannweite ihrer wahrscheinlichen zukünftigen Entwicklung abschätzen zu können. Anschließend werden im Zuge der sich ergebenden Spannweiten die Rahmenparameter für drei Szenarien festgelegt. Zudem werden die eruierten Rahmenparameterintervalle im Sinne einer Wahrscheinlichkeitsbetrachtung mit Darstellung des möglichen Bereichs der Gebührentwicklung verwendet. Im Anschluss erfolgt in Kapitel 4.4 eine detaillierte Beschreibung zum Aufbau des entwickelten Modells und der drei enthaltenen Module. Es werden das integrierte Kanalalterungsmodell, welches auf den Hertz-Überlebensfunktionen beruht, der für die Prozessbeschreibung der KA verwendete statische Bemessungsansatz nach DWA-A-131 (2016) sowie die Kosten- und Gebührenkalkulation erläutert. Neben der mathematischen Beschreibung der Prozesse und Zusammenhänge findet eine ausführliche Erläuterung der wirtschaftlichen und rechtlichen Besonderheiten für Aufgabenträger der Abwasserwirtschaft statt. Im letzten Abschnitt des Kapitels wird zur Ermittlung des Intervalls der wahrscheinlichen zukünftigen Mengengebührentwicklung, die Erweiterung des Modells durch die Integration des Monte-Carlo-Ansatzes beschrieben.

In Rücksprache mit dem für diese Untersuchung im Modell abgebildeten Aufgabenträger wurden im Vorfeld drei Anpassungsmaßnahmen ausgewählt und zur Integration ins Modell in Module umgesetzt. Der Aufbau dieser Module wird in Kapitel 5 dargestellt. Zu den ausgewählten Anpassungsmaßnahmen gehören die energetische Faulgasnutzung, eine weitergehende Zentralisierung durch Stilllegung von KA und Überleitung derer Abwässer sowie der Zusammenschluss mit anderen Aufgabenträgern zur Schaffung größerer Strukturen.

In Kapitel 6 ist die, zur Erhöhung der Ergebnisgenauigkeit erfolgte Parameteranpassung und anschließende Validierung von prozessbasierten als auch ökonomischen Parametern des Modells beschrieben. Die Parameteranpassung wurde anhand historischer und die Validierung mittels aktueller Daten des ausgewählten Aufgabenträgers durchgeführt.

Mit dem kalibrierten Modell wurde mittels einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss der Rahmenparameter einzeln als auch überlagert auf die Gebührentwicklung untersucht und die Ergebnisse in

## 1. Einleitung

---

Kapitel 7 festgehalten. Ziel dieser Betrachtung ist die Benennung des maßgebenden Gebührentreibers. Am Ausgangspunkt steht die Vermutung, dass nicht die Bevölkerungsreduktion maßgeblich ist.

Die Ergebnisdarstellung der Prognosesimulation in Kapitel 8 ist untergliedert in die Auswertung der Monte-Carlo-Simulation (MCS), unter der Angabe der wahrscheinlichen maximalen Bandbreite der Gebührenentwicklung und der Auswertung der drei Szenarien-Simulationen zur detaillierteren technischen und ökonomischen Analyse unter definierten Rahmenbedingungen. Durch die Konzeption eines Positiv- und Negativszenarios mit den minimal und maximal zu erwartenden Rahmenbedingungen wird die aufgezeigte Bandbreite der Gebührenentwicklung der MCS zusätzlich durch technische Daten und die Auswirkungen auf die Systeme abgedeckt. Zur Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit in Bezug zu anderen Prognosen aus der Literatur werden diese miteinander verglichen und bestehende Abweichungen erläutert.

Nach erfolgter Darstellung der zukünftigen Entwicklung des ausgewählten Aufgabenträgers bis ins Jahr 2050 werden im anschließenden Kapitel 9 die Effekte und Potentiale der drei mit dem Modell betrachteten Anpassungsmaßnahmen im Einzelnen als auch in Kombination quantifiziert. Bei der Kombination von Maßnahmen wurden die zwei infrastrukturellen Maßnahmen jeweils mit der Maßnahme Zusammenschluss kombiniert. Hierfür wurde der Aufgabenträger ausgewählt, der sich am geeignetsten für den Zusammenschluss erwies. Dieses Kapitel schließt mit einer zusammenfassenden Bewertung.

Abschließend folgen in Kapitel 10 eine Zusammenfassung der Arbeit und Ergebnisse sowie Antworten auf die aufgeworfenen Fragen und die aufgestellten Hypothesen in der Einleitung, welche sich im Zusammenhang mit dem Thema im Vor herein ergaben. Zudem wird ein Ausblick für die Erweiterung und Verbesserung des Modells gegeben.

## **2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung**

Aufgrund langer technischer Nutzungsdauern von abwasserwirtschaftlichen Systemen, u.a. 25 Jahre für die Maschinenteknik von Behandlungsanlagen, 50 Jahre für deren Betonbauwerke und 50 bis 80 Jahre für Kanalnetze, sind flexible, kurzfristige und kostensenkende bautechnische Anpassungen an den Bevölkerungsrückgang nicht umsetzbar. Hinsichtlich der hohen Investitionskosten und Abschreibungszeiträume bedarf es eines langen Planungshorizonts für die Auslegung dieser Systeme. Dies führt zu einer starken Beeinträchtigung der Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen und schränkt das Handlungsfeld ein. Neben den Anpassungsmaßnahmen in der Infrastruktur existieren Ansätze in den Bereichen Organisation und Finanzen. In diesen Bereichen sind Anpassungsmaßnahmen im kurz- bis mittelfristigen Zeitraum umsetzbar. Die Auswahl der hier vorgestellten Maßnahmen stammt aus der Literatur sowie aus dem Erkenntnisgewinn durch die Partizipation am Leitbildprozess zur Zukunftsfähigkeit der Siedlungswasserwirtschaft in Brandenburg, dem Erfahrungsaustausch mit dem Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt (MLU) bezüglich des Leitbildes von Sachsen-Anhalt zur Bildung großer Organisationsstrukturen als auch der Expertenrunde zum sektorenübergreifenden Diskussionsprozess über die Auswirkungen auf die sozialen und technischen Strukturen durch den demografischen Wandel und deren Bewältigung in M-V. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte der Leitbilder, deren Entwicklungsprozess sowie der enthaltenen Anpassungsmaßnahmen sind Gießler und Tränckner (2014) zu entnehmen.

### **2.1 Infrastrukturelle und technische Anpassungsmaßnahmen**

In den Bereichen Kanalnetz und Abwasserbehandlungsanlagen gibt es eine Vielzahl von Anpassungsmaßnahmen zur Optimierung und für die Sicherstellung der Betriebssicherheit (Tränckner et al. 2014, Tränckner 2013, Hillenbrand et al. 2011, Hillenbrand et al. 2010, Winkler 2010, Scheer und Schlegel 2008). Zum Teil können durch diese Maßnahme Kosten gesenkt werden, jedoch führen sie zu keinen relevanten Kosteneinsparungen, weshalb diese nicht Gegenstand dieser Betrachtung sind. Größere Kosteneinsparungen lassen sich vorwiegend erzielen durch langfristige Systemwechsel und Strukturanpassungen durch den Rückbau von Teilstrecken des Entwässerungsnetzes (Schiller 2010, Kluge und Scheele 2008, Kluge und Libbe 2006, Koziol et al. 2006, Herz et al. 2002) im Sinne einer Dezentralisierung oder im Umkehrschluss einer weiterführenden Zentralisierung durch mittelfristige Stilllegungen von KA mit anschließender Überleitung des Abwassers zu einer anderen KA. Als kurzfristig umzusetzende Maßnahmen sind Anlagenerweiterungen zur Eigenstromversorgung, die Steigerung der Energieausbeute durch Co-Substrate und die Ressourcennutzung durch Stoffstromseparation und -nutzung (Grauwassernutzung) zu nennen.

Die relevanten Anpassungsmaßnahmen der technischen Infrastruktur im Bereich der Schmutzwasserentsorgung sind in Tabelle 2-1 dargestellt.

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

**Tabelle 2-1:** Anpassungsmaßnahmen der technischen Infrastruktur im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

Anpassungsmaßnahme	Kurzbeschreibung	System- bezug	Zeit- horizont
Leitungsrückbau (Dezentralisierung)	Rückbau von Leitungen und Schaffung kleinerer dezentraler Einheiten Integration von neuartigen Sanitärsystemen (NASS)	Kanal	L
Aufgabe von Siedlungsgebieten	Kompletter Rückbau der Infrastruktur		M
Strategische Sanierungsplanung	Verlagerung von Investitionskosten bei der Instandhaltung von Kanalnetzen		
Umstellung der Verfahrenstechnik	Umstellung Schlammstabilisierung von aerob zu anaerob oder Einsatz von naturnahen Verfahrenstechniken statt konventioneller Belebungsverfahren	KA	M
Modulare, temporäre Container-KA	Senkung der Investitionskosten durch kompakte Bauweise und flexiblen Einsatz (nach Bedarf erweiterbar oder rückbaubar)		
KA-Stillegung (Zentralisierung)	Weitergehende Zentralisierung durch Stillegung von KA und Überleitung der Abwässer zur nächstgelegenen KA		
Eigenstromproduktion	Elektrische Faulgasnutzung (Klärgas)		K
Energieproduktions- steigerung	Durch Einsatz von Co-Substraten sowie zusätzl. regenerativer Energien (Photovoltaik- und Windenergie)		
Entsorgung des Küchenabfalls über das Abwassersystem	Küchenabfallentsorgung durch Einbau von Küchenabfallzerkleinerer in den Haushalten, führt zur Reduktion des Bioabfalls und zur Erhöhung der Gasausbeute durch zusätzl. organisches Material		

L: Langfristig (>25 Jahre), M: Mittelfristig (5 - 25 Jahre), K: Kurzfristig (<5 Jahre)

Anpassungsmaßnahmen im Bereich des Schmutzwasserentsorgungsnetzes (SWEN) zur Senkung der Kosten sind aufgrund der langen Nutzungsdauer, des Verbaus im Untergrund und der hohen Investitionskosten i.d.R. nicht umsetzbar. Dabei findet im Verhältnis zu den Abwasserbehandlungsanlagen mit ca. 60 % bis 70 % der Sachanlagenwerte die größte Kapitalbindung in diesem Bereich statt. Bauliche Anpassungen und Veränderungen würden zwar eine Kostenreduktion mit sich bringen, doch führen diese innerhalb des Abschreibungszeitraumes direkt zu Erhöhung der Kapitalkosten. Um Einsparungen zu erzielen sind Maßnahmen, wie eine Systemumstellung durch die Integration von Neuartigen Sanitärsystemen (NASS) oder dem Rückbau von Kanälen durch den Einsatz von kleineren dezentralen Anlagen nur langfristig nach erfolgter Abschreibung durchführbar.

Angeichts der hohen Kapitalbindung durch die Investitionen im Kanalnetz können durch den Rückbau von Einzelstrecken Kosten eingespart werden (Kozioł 2007). Dies ist jedoch nicht zwangsläufig in allen Städten zu bewerkstelligen, denn in Städten mit historisch gewachsener Infrastruktur sind gerade die Kanalleitungen in den Randgebieten im Vergleich zu denen im Stadtkern wesentlich jünger und daher noch abschreibungspflichtig sowie gebührenwirksam (Winkler 2010). Um- bzw. Rückbauprogramme sind über einen langfristigen Zeitraum zu planen und als Vorzugsvariante zu wählen, wenn sich entlang systematischer Dezentralisierungspfade Kostenentlastungen ergeben (Schiller 2010). Die Abwässer der Ortsteile, welche durch den Rückbau der Kanalisation vom zentralen Entsorgungssystem abgekoppelt werden, werden zukünftig durch zu installierende kleinere dezentrale Kleinkläranlagen

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

(KKA) gereinigt. Neben dem Rückbau von Teilsträngen des Kanalnetzes und dem Bau von Ortsteil-KA im städtischen Raum, kann nach Abschreibung des Abwassersystems in kleineren Gemeinden der Rückbau bis hin zur Einzel-KKA für ein Grundstück oder im Verbund in Form einer Gruppen-KKA (bis zu 50 EW) in Bezug auf eine Kostensenkung zielführend sein. Im Fall, dass der Bau von KKA (Einzel- oder Gruppen-KKA) eine wirtschaftliche Lösung darstellt, kann der Aufgabenträger vom vorherigen Abwasserbeseitigungskonzept abweichen, die Anlagen errichten und deren Betreibung über ein Dienstleistungsmodell (Kümmerer- oder Contracting-Modell) vollziehen. Zur Wahrung der gesetzlichen Bestrebungen im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG) zur Verbesserung des Gewässerzustandes, erteilt die zuständige Wasserbehörde für diese Konzepte lediglich eine Einleiterlaubnis gemäß den Landeswassergesetzen (LWG), wenn die Qualitätsanforderungen an das einzuleitende Abwasser erfüllt werden. Abgesehen von den Qualitätsanforderungen des Gewässers entsprechen KKA durch ihre biologische Reinigung dem Stand der Technik, welcher vom Wasserhaushaltsgesetz (WHG) § 57 gefordert und in der Abwasserverordnung (AbwV) im Anhang 1 Teil C anhand von Mindestanforderungen an das Abwasser definiert ist. Inwiefern dezentrale Konzepte kostengünstiger als zentrale Konzeptionen sind, ist abhängig von Faktoren, wie der Siedlungsdichte, Topografie sowie der Gebietsgröße und ist fallkonkret zu überprüfen. Je nach Bedingung können die einwohnerspezifischen Kosten unter denen eines zentralen Anschlusses liegen. Durch die Bündelung von mehreren Grundstücken an eine Gruppen-KA lassen sich die Investitions- und Betriebskosten weiter reduzieren.

Ein weitergehender Ansatz ist die propagierte kontrollierte Aufgabe von Siedlungsgebieten. Diese scheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt politisch jedoch nicht durchsetzbar (Hubner 2014). Gerade im ländlichen Raum kommt es durch den demografischen Wandel zu einer Überlagerung in der strukturellen Veränderung und führt in den Gemeinden zu sinkenden Steuereinnahmen und Gebühren bei gleichzeitig steigenden Kosten der technischen Infrastruktur, zum Rückgang der sozialen Infrastruktur und Nahversorgung als auch zur Einschränkung der Mobilität und medizinischen Versorgung, was im Gesamtkontext die Entwertung der Immobilien bedeutet. Daraus folgt die Hinterfragung der Existenzberechtigung von betroffenen Siedlungsstrukturen. Zur Umsetzung dieses Ansatzes wird zur Finanzierung von Umsiedelungen ein Rückbau- oder Rückkauffonds empfohlen (Kröhnert et al. 2011).

Eine andere Möglichkeit für die Umsetzung einer Dezentralisierung mit gleichzeitiger Stoffstromnutzung ist die Integration von NASS unter Nutzung der bestehenden Abwasserinfrastruktur. Des Weiteren eignen sich NASS-Konzepte auch für die Konzeption von neuen Siedlungsgebieten. Mittels der NASS findet eine weitergehende Abwasserstromtrennung statt, welche bereits am Ort des Anfalls (im Haushalt) erfolgt (Londong et al. 2011). Von der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) wurden in Bezug auf sechs definierte Systemgruppen mehrere vielfältige situations- und zielangepasste Systemvarianten mit den notwendigen Komponenten zusammengestellt (DWA 2008b). Durch die Separation der Abwasserströme und deren unterschiedliche stoffspezifische Belastungen sind Verfahren zur gezielten Nährstoffrückgewinnung und Brauchwasseraufbereitung anwendbar. Daraus ergeben sich vielfältige gestalterische Möglichkeiten für Abwasserinfrastruktursysteme (Horn et al. 2013, Larsen et al. 2013, Walther et al. 2013). Bei der



## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

Integration in bestehende Systeme ergibt sich der Nachteil, dass durch die Grauwasserwiederverwendung der größte Anteil des Schmutzwassers entzogen wird und es dadurch zu einer erhöhten Ablagerungsneigung im Kanal kommt (Tränckner 2013). Besonders ökonomisch sind diese Konzepte bei Grundstücken in Einzel- und Gruppenlösungen, wo es keines zentralen Sammlers und somit keiner Vakuum- oder Druckrohrleitung bedarf. Obwohl NASS in einigen Pilotprojekten umgesetzt wurden, haben sich diese Systeme bisher nicht flächendeckend durchsetzen können. Eine Hemmschwelle für die Etablierung dieser Konzepte sind der geringere Entsorgungskomfort im Vergleich zu konventionellen zentralen Entsorgungskonzepten und die hygienischen Bedenken (Geyler et al. 2014).

Neben baulichen Anpassungsmaßnahmen führen beim Kanalnetz Instandhaltungsstrategien zu relevanten Kosteneinsparungen. Bei einer bedarfsgerechten Instandhaltung mit Werterhalt der Sachanlagenwerte geht es um den gezielten Einsatz von Investitionen für das Kanalnetz. Es werden vorrangig abgeschriebene Leitungsabschnitte erneuert bzw. saniert, welche sich in einem schlechten Zustand befinden. Nicht sanierte Kanäle, welche sich ebenfalls im schlechten Zustand befinden sind bis zum Zeitpunkt der Erneuerung bzw. Sanierung bedarfsweise durch Reparaturen in einem betriebsfähigen Zustand zu halten. Durch Reparaturen kann einer Verschlechterung des Kanalzustandes kurz- bis mittelfristig entgegengewirkt und somit der Investitionszeitpunkt einer Erneuerung verschoben werden. Da eine große Anzahl an Reparaturen ebenfalls sehr kostenintensiv ist, handelt es sich bei der Instandhaltung von Kanalnetzen um einen strategischen Balanceakt. Je nach Strategie und konsequenter Umsetzung können dabei Kosten einspart werden.

Hinsichtlich der Abschreibungsdauern von KA befinden sich die Anpassungsmaßnahmen überwiegend im mittelfristigen Zeithorizont. Nach Abschreibungsende der Anlage stehen verschiedene Optionen zur Disposition. Bei Anlagen mit aerober Schlammstabilisierung kann in Abhängigkeit von deren Größenklasse eine Verfahrensumstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung ökonomischer sein. Zwar muss in Folge die Anlage um eine Vorklärung (VK) erweitert werden, aber durch das geringere Schlammalter und die damit verbundene geringere Feststoffmasse bedarf es bis zu 50 % weniger Volumen im Belebungsbecken. Durch die Senkung des Sauerstoffbedarfs reduziert sich der Energieverbrauch für die Belüftung um ca. 26 %. Zudem kann bei einer Schlammfäulung durch den 20 % höheren organischen Anteil im Schlamm mehr Energie erzeugt und durch den Abbau des organischen Materials der Schlammanfall reduziert werden (Schreff 2010). Neben den investiven und betrieblichen Einsparungen bei dieser Verfahrensumstellung, können durch die Eigenstromversorgung die Energiekosten gesenkt werden. Bei konventionellen KA ab 20.000 EW kann die nachträgliche Installation einer Faulung als kurzfristige Maßnahme zur Reduktion von Kosten betrachtet werden. Zusätzlich lässt sich als weitere kurzfristige Maßnahme bei nicht ausgelasteten Faulbehältern die Klärgasproduktion durch Co-Substrate steigern (Schreff 2010). Bei vorhandenen freien Flächen kann die Energieproduktion durch Wind- oder Solarenergie weiter gesteigert werden. Eine weitere jedoch umstrittene Möglichkeit den Gasertrag zu erhöhen, ist die Nutzung der abwassertechnischen Infrastruktur zum Transport und Entsorgung organischer Küchenabfälle (Battistoni et al. 2007). Durch die Integration von Küchenabfallzerkleinerer in den Haushalten kann der Gasertrag um 75 % bis 100 % gesteigert werden (Kegebein 2006, Wendler und Rosenwinkel 2003). Hydraulische Beeinträchtigungen des Kanalsystems durch den Transport der zerkleinerten Küchenabfälle sind in Deutschland hinsichtlich der Dimensionierung entsprechend der technischen

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

Richtlinien und den damit verbundenen Transportbedingungen nicht zu erwarten. Jedoch sind erhöhte Reinigungsaufwendungen in moderatem Umfang nicht auszuschließen (Mattsson et al. 2015, 2014, Thomas 2011, Kegebein 2006). Aufgrund zusätzlicher stofflicher Belastungen bei Mischwasserabschlägen, beschränkt sich der Einsatz von Küchenabfallzerkleinerern lediglich auf abwasserwirtschaftliche Strukturen im Trennsystem. Die Anschaffung der Geräte hat durch die Haushalte zu erfolgen, als Kompensation für diese Ausgaben sind die Minderung der Bioabfallgebühr, durch die Reduktion des Bioabfalls um die Küchenabfallmenge (für Gartenabfälle und Grünschnitt bleibt Biotonne weiterhin erforderlich) sowie die Abwassergebührensenkung durch einen erhöhten Eigenstromanteil zu verrechnen. Entgegen des weltweiten Einsatzes von Küchenabfallzerkleinerern, wie in den USA wo 50 %, in Neuseeland 20 % oder in Australien und Kanada ca. 10 % der Haushalte ausgestattet sind, liegt in Europa eine ablehnende Haltung gegenüber diesen Geräten vor. In Deutschland ist der Einsatz von Küchenabfallzerkleinerern in den meisten Abwassersatzungen direkt oder indirekt untersagt. Deshalb wäre für die Integration von Küchenabfallzerkleinerern in Deutschland eine Anpassung der Satzungen als auch eine klare Abgrenzung des Abfallbegriffes für Küchenabfälle im Wasser- und Abfallrecht notwendig (Kegebein 2006).

Als weitere Maßnahme ist abgesehen von der Verfahrensumstellung von einer aeroben zu einer anaeroben Schlammstabilisation nach Abschreibungsende der Anlage ein Verfahrensvergleich bei der Planung zu berücksichtigen. Dabei können bei KA der Größenklassen 1 (<1.000 EW) neben technische auch naturnahe Verfahren (Abwasserteiche, Pflanzenkläranlagen) in Betracht gezogen werden. Naturnahe Verfahrenstechniken reinigen das Abwasser nach dem Stand der Technik und halten die geltenden Grenzwerte ein. Diese Anlagen sind wartungsarm und haben aufgrund des geringen Energieverbrauchs sehr geringe Betriebskosten. In ländlichen Gebieten stellt die benötigte Fläche für diese Anlagen selten eine Schwierigkeit da. Neben dem Flächenbedarf ist ein weiterer Nachteil dieser Verfahrenstechniken die saisonale Beeinflussung der Reinigungsleistung durch Frost im Boden bei Pflanzenkläranlagen (PKA) oder Eisflächen und Algenblüte bei Abwasserteichen. Dies führt durch die Sauerstoffbeeinflussung und den dadurch gehemmten biologischen Abbau zu starken Schwankungen bei den Ablaufwerten (LU 2006). Eine Reduktion der Kosten ist auch durch eine Kompaktbauweise in Form des Sequencing-Batch-Reactor (SBR) möglich, in dem Anlagenkomponenten eingespart werden. Der Betrieb dieser Anlagen ist jedoch sehr komplex und führt zu höheren Wartungsaufwänden. Neben der Einsparung von Anlagenkomponenten können in ländlichen Gebieten mit einer stark schrumpfenden Bevölkerung auch modulare oder mobile temporäre Konzepte ein Lösungsansatz zur Kosteneinsparung sein (Theilen 2014). Hohe Kosten verursacht der Tiefbau, weshalb eine Containerbauweise im modularen System weniger Baukosten verursacht. Zudem sind die Module schrittweise rückbaubar, wodurch die Anlage den gegenwärtigen Bedingungen angepasst werden kann. Die kompakte Bauweise von Modul-KA wird durch die Membrantechnologie in Form von Membranbioreaktoren (MBR) ermöglicht (Zech et al. 2008, Schmid-Schmieder 1994). Eine weitere im Kontrast zur Dezentralisierung stehende Maßnahme zur Kostensenkung kann in Abhängigkeit von der Lage, Topografie und ortspezifischen Faktoren eine weitergehende Zentralisierung sein. Nach dem Abschreibungsende wird die KA stillgelegt und die Abwassermengen durch ein Pumpwerk (PWK) zur nächstgelegenen KA übergeleitet. Der Transport des Abwassers vom PWK zur aufnehmenden KA erfolgt über einen Überleitungskanal. Bei ausreichender Kapazität der aufnehmenden KA sind keine

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

erweiternden Baumaßnahmen an der Anlage notwendig, was kostenseitig das Konzept begünstigt. Aufgrund der hohen Kosten für den Bau einer Überleitung, der Pumpstation und den Energiekosten für den Betrieb der Pumpe kommen für eine ökonomische Umsetzung nur nahegelegene Ortschaften in Frage, da ansonsten die Reinvestition der stillzulegenden KA kostengünstiger ist. In Anbetracht der Vielfalt an Maßnahmen ist die Auswahl der geeigneten Maßnahme unter Berücksichtigung sämtlicher ortsspezifischer Faktoren und Gegebenheiten zu treffen.

### 2.2 Organisatorische Anpassungen

Für eine sichere und nachhaltige Abwasserentsorgung bedarf es effizienter und gut aufgestellter Aufgabenträger. Die Effizienz wird unter anderem durch die Organisationsstruktur geprägt. Im Zusammenhang mit der Organisationsstruktur stehen die Personalkosten, welche bei deutschen Abwasserentsorgern durchschnittlich 19 % der Gesamtkosten (Verbände der Wasserwirtschaft 2015) ausmachen. Optimierungen in der Organisationsstruktur beinhalten deshalb ein großes Einsparpotential. Dabei sind vornehmlich Optimierungen im Bereich der Verwaltung, bei zusätzlichen Aufgaben des Sonderinteresses von Kommunen und in der übergeordneten Hierarchiestruktur zu erzielen. Im Gegensatz zur Verwaltung sind im betrieblichen Bereich die benötigte Personalzahl für die Bewirtschaftung der Systeme durch die Vorgaben der Selbstüberwachungsverordnungen für KA und Kanal vorgeschrieben. Für Strukturoptimierungen im gesamtunternehmerischen Kontext gibt es verschiedene Ansatzpunkte, welche sich kostensparend auswirken können. Unter anderem können die Überprüfung von Aufgaben hinsichtlich deren Eigenerfüllung oder Fremdvergabe, eine Bündelung von Aufgaben in Form einer Kooperation, die Umstellung des bestehenden Geschäftsmodells durch Beteiligung privater Dritter oder die Schaffung größerer Strukturen durch Zusammenschlüsse zielführend sein. Maßnahmen in der Organisationsstruktur lassen sich im kurzfristigen Zeithorizont (< 5Jahre) umsetzen.

Eine Übersicht über Anpassungsmaßnahmen in der Organisationsstruktur ist in Tabelle 2-2 dargestellt.

**Tabelle 2-2:** Anpassungsmaßnahmen im Bereich der Organisationsstruktur

Anpassungsmaßnahme	Kurzbeschreibung	Bindungs- form	Zeit- horizont
Eigenerfüllung/ Fremdvergabe (Insourcing/ Outsourcing)	Kostenseitige Abwägung zw. Eigenerfüllung und Fremdvergabe von Aufgaben	Ko	K
Aufgabenerweiterung (interne Ausrichtung)	Kommunale Kooperationsbeziehungen für andere kommunale Aufgaben (neue Geschäftsfelder)		
Informelle Zusammenarbeit	Interessengemeinschaften wie Kompetenz-/ Wissenszentren oder Arbeitsgemeinschaften		
Institutionelle Zusammenarbeit	Zivilrechtl. Zusammenarbeit durch die Bildung von Einkaufsgemeinschaften, Kooperationslabore, etc.		
Geschäftsmodelle mit privater Beteiligung (ÖPP - Modelle)	Betriebsführungs-, Betreiber- oder Kooperationsmodell	Konz.	
Schaffung größerer Strukturen (Vergrößerung der aufgabenbezogenen Gebietskörperschaft)	Zusammenschluss von Kommunen bzw. Gemeinden zu Zweckverbänden oder Kommunal-/ Gemeindewerke		
	Zusammenschluss von Zweckverbänden oder Kommunal-/ Gemeindewerke	Fu	

K: Kurzfristig (<5Jahre), Ko.: Kooperation, Konz.: Konzentration, Fu: Fusion

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

Kosteneinsparungen in der Organisationsstruktur lassen sich durch eine Optimierung der inneren Struktur und einen Hierarchieabbau durch Zusammenlegen von Organisationseinheiten und Einführung flacherer Strukturen bewerkstelligen. In Abhängigkeit von der Größe des Aufgabenträgers, dessen Leitungsnetz und Anzahl der KA birgt eine kostenseitige Überprüfung der Aufgaben bezüglich ihrer Eigenerfüllung oder Fremdvergabe Potentiale zur Senkung der Kosten. Bei kleineren Aufgabenträgern kann die Fremdvergabe von betrieblichen Leistungen, wie Laboranalysen, Bauplanung, Kanalinspektion, -reinigung, Schlammtransport, -entsorgung oder Leistungen der Verwaltung wie Einkauf, EDV, IT, weiterer kaufmännischer Services usw., kostengünstiger sein als die Eigenerfüllung dieser Aufgaben, weil die Auslastung nicht ausreicht, um kosteneffizient zu wirtschaften. Um eine wirtschaftliche Größe im Sinne der Auslastung für die Bewältigung der jeweiligen Aufgaben zu erreichen, ist die Schaffung von größeren Strukturen bzw. Bündelung oder Zentralisierung von Aufgaben zweckdienlich. Hierfür gibt es folgende Möglichkeiten des Zusammenwirkens mit unterschiedlichen Intensitätsstufen: die Kooperation, Konzentration und den Zusammenschluss (auch Fusion genannt). Dabei nimmt die Intensität des Zusammenwirkens schrittweise unter Steigerung der Abhängigkeiten und gegenseitiger Einflussmöglichkeiten von Kooperation zur Konzentration stetig zu (Graetz 2008).

Bei der Kooperation kann zwischen einer informellen (schwach institutionalisierte Form) und formellen Kooperation (stark institutionalisierte Form) mit einem betriebswirtschaftlichen, technischen, ressourcen- oder sektorübergreifenden Bezug unterschieden werden (Kluge und Libbe 2006). Charakteristisch für Kooperationen ist, dass die Vertragsverhältnisse häufig zeitlich befristet sind und die rechtliche sowie wirtschaftliche Selbstständigkeit der Beteiligten gewahrt bleibt (Graetz 2008). Mit Kooperationen lassen sich Aufgaben zwischen Akteuren vertraglich koordinieren oder durch deren Übertragung auf eine gemeinschaftliche Einrichtung oder einen privaten Dritten ausgliedern (outsourcen). Unter den öffentlichen Aufgabenträgern sind informelle Kooperationen in Form von Kompetenzzentren, Arbeits- oder Kooperationsgemeinschaften gängig. Bei diesen Kooperationen steht der Erfahrungs- und Wissensaustausch im Vordergrund. Eine weitere kollektive Handlungsstrategie ist die Bündelung von Aufgaben mittels einer institutionellen Kooperation, bei welcher sich zwei oder mehrere Aufgabenträger vertraglich zusammenschließen, um eine wirtschaftliche Auslastung für die Bewältigung der jeweiligen Aufgabe, wie z.B. in Form eines Kooperationslabors, Zentralisierung des Einkaufs oder Finanzdienstleistungen usw., zu erreichen (MLUL 2015, Graetz 2008).

Zwischen öffentlichen Aufgabenträgern und privaten Leistungsträgern existieren ebenfalls diverse Kooperationsformen, wie Liefer- und Dienstleistungsverträge, welche Materiallieferungen determinieren oder die bereits oben genannten Aufgaben an Dritte übertragen. Für die Übertragung von Kompetenzen auf private Leistungsträger stehen den öffentlichen Aufgabenträgern verschiedene eigentumsbasierte Vertragsmodelle wie das Betriebsführungs-, Betreiber- und Kooperationsmodell zur Verfügung. Vertragsmodelle zur geregelten Zusammenarbeit von öffentlichen Aufgabenträgern und Unternehmen der Privatwirtschaft in einer Zweckgesellschaft werden als öffentlich-private Partnerschaft (ÖPP, oder englisch Public Private Partnership - PPP) bezeichnet. Zweck dieser Verträge ist die Arbeitsteilung, bei welcher der private Leistungsträger die Verantwortung zur effizienten

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

Leistungserstellung übernimmt und der öffentliche Aufgabenträger die Einhaltung der gemeinwohl-orientierten Ziele gewährleistet (Graetz 2008, Klinkenberg 2007, Tegner und Rehberg 2006).

Das Betriebsführungsmodell basiert auf einem Betriebsführungs- oder Geschäftsbesorgungsvertrag, in welchem die funktionelle Verantwortung geregelt wird. Bei diesem i.d.R. 5 bis 15 Jahre andauernden Vertragsverhältnis kann die technische als auch die kaufmännische Betriebsführung übertragen werden, wobei die Kommune Betreiber sowie Eigentümer der Anlagen bleibt und das volle Risiko trägt. Die Übertragung der Betriebsführung kann sich separat auf die KA oder das Kanalnetz als auch auf das gesamte Anlagensystem beziehen (Klinkenberg 2007, Tegner und Rehberg 2006).

Anders als das Betriebsführungsmodell umfasst das Betreiber- bzw. Konzessionsmodell sämtliche Finanzierungsaufgaben und beinhaltet die wirtschaftliche Verantwortung als auch das wirtschaftliche Risiko. Es kommt der vollständigen Erfüllung einer öffentlichen Aufgabe gleich. Dies beinhaltet das Projektmanagement, die Planung und den Bau, die Finanzierung als auch den Betrieb sowie die Instandhaltung der Anlagen. Bei diesen Vertragsmodellen gehen die notwendigen Sachanlagenwerte in das Eigentum des privaten Leistungsträgers über und schränken somit die Eingriffsmöglichkeiten der Kommune ein. Der Leistungsträger (Betreiber) handelt nach außen grundlegend nur im Namen und im Auftrag des Aufgabenträgers. Die Verantwortung für die Aufgabe trägt weiterhin der zur Leistungserbringung verpflichtete Aufgabenträger. Diese Art der Kooperation beinhaltet i.d.R. Vertragslaufzeiten, welche der kalkulierten Lebensdauer der Anlagen entsprechen. Der Unterschied zwischen einem Betreibervertrag und einem Konzessionsvertrag liegt in der Gebührenhöhe. Bei der vertraglichen Gestaltung eines Betreibervertrages bleibt die Gebührenhöhe beim Aufgabenträger, die Vergütung des Leistungsträgers erfolgt in Form des Betreiberentgeltes über den Aufgabenträger und ist unabhängig von der Höhe der eingezogenen Gebühren. Anders verhält es sich beim Konzessionsvertrag, darin geht der Leistungsträger eine unmittelbare Benutzungs- und Entgeltbeziehung mit den Nutzern ein (Geßner 2009, Klinkenberg 2007, Tegner und Rehberg 2006).

Beim Kooperationsmodell wird zwischen dem Aufgabenträger und dem privaten Leistungsträger eine privatrechtliche Kooperationsgesellschaft gegründet, bei welcher der Aufgabenträger i.d.R. den Mehrheitsanteil von 51 % behält, um größeren Einfluss auf die Gesellschaft nehmen zu können. Dabei handelt es sich um eine „gemischtwirtschaftliche“ Gesellschaft, welche bei Anteilsmehrheit des Aufgabenträgers dennoch zu den kommunalen Unternehmen zählt. Die vertragliche Ausgestaltung des Kooperationsmodells ergibt sich aus dem Gesellschafts- und Leistungsvertrag und lässt vielfältige Optionen zu. Dabei kann die gegründete Betreibergesellschaft teilweise als auch die vollständige Aufgabenerfüllung übernehmen. Größtenteils werden diese Gesellschaften als Träger des Anlagenvermögens eingesetzt, während der private Anteilseigner (Leistungsträger) für die konkrete Aufgabenwahrnehmung eingesetzt wird (Klinkenberg 2007, Tegner und Rehberg 2006).

Bei der Konzentration subsumieren sich die Akteure unter einer einheitlichen Leitung und unter Einschränkung oder vollständiger Aufgabe ihrer wirtschaftlichen Selbstständigkeit. Die rechtliche Selbstständigkeit kann dabei gewahrt bleiben (Graetz 2008). Im Bereich der Abwasserwirtschaft führen Konzentrationen zu Zusammenschlüssen in Form von Zweckverbänden oder Kommunalwerken. Zweckverbände sind mit 34 % in der Abwasserwirtschaft die häufigste Organisationsform (DWA 2014). Bei einem Zweckverband handelt es sich im Sinne der interkommunalen Kooperation

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

um einen Zusammenschluss kommunaler Aufgabenträger zur Aufgabenübertragung mittels öffentlich-rechtlichen Vertrags (Freiverband) oder per Landesgesetz bzw. Zweckverbandsgesetz (Pflichtverband bzw. gesetzlicher Zweckverband). Als Körperschaft des öffentlichen Rechts ist die Selbstverwaltung eines Zweckverbandes in der Verbandssatzung geregelt. Zudem sind in der Satzung die Mitglieder, die Aufgaben und die Finanzierung festgelegt (Vogelgesang et al. 1997, Minkner 1994). Unter Kommunalwerken sind Stadt- bzw. Gemeindewerke zu verstehen. Diese gehören zu den kommunalen Unternehmen, welche zur Erfüllung der öffentlichen Aufgaben eine rein öffentliche oder gemischt-wirtschaftliche Unternehmensform im mehrheitlichen Besitz einer oder mehrerer Kommunen haben können. Kommunalwerke können demnach als öffentlich-rechtliche Betriebe (Eigenbetrieb, Regiebetrieb, Anstalt des öffentlichen Rechts) sowie privatwirtschaftlich als GmbH oder AG organisiert sein (Scholz und Pitschas 1982).

Die Fusion ist die intensivste Form des Zusammenwirkens, bei der im Gegensatz zur Konzentration die rechtliche Selbstständigkeit zumindest eines Akteurs aufgegeben wird. Nach einer Fusion agieren die Beteiligten als ein Unternehmen (Wöhe und Döring 2010). Dabei kann eine Fusion durch Aufnahme oder Neugründung erfolgen. Bei einer Aufnahme nimmt das aufnehmende Unternehmen das Vermögen, die Sachanlagenwerte als auch die Verbindlichkeiten des aufgehenden Unternehmens auf. Das aufgehende Unternehmen verliert seine Existenz. Bei einer Fusion durch Neugründung entsteht ein neues Unternehmen, welches die Vermögenswerte und Verpflichtungen der vorherigen Unternehmen konsolidiert (MUVE BW 2003). Bezogen auf die Abwasserwirtschaft sind Fusionen zwischen den unterschiedlichsten öffentlich-rechtlichen Unternehmensformen der Aufgabenträger durchführbar. Somit können Zweckverbände andere Zweckverbände aufnehmen oder zusammen einen neuen Zweckverband gründen.

Neuorganisationen, Kooperationen oder Fusionen führen nicht zwangsläufig zu besseren wirtschaftlichen Ergebnissen. Einsparpotentiale ergeben sich aus Synergie- und Einspareffekten in der technischen Infra- und Organisationsstruktur. Die Umsetzung dieser Maßnahmen hat einen vergleichsweise kurzen Zeithorizont, jedoch machen sich Einspareffekte erst verzögert bemerkbar. Dies liegt unter anderem an den Kosten, welche mit der Umorganisation und Umstrukturierung verknüpft sind. Durch die Schaffung einer größeren Struktur durch Zusammenschlüsse ergibt sich durch Kapazitätsauslastung und Lerneffekte eine größenbedingte Kostendegression. Das größte Synergiepotential steckt dabei in der Zusammenlegung des Finanz- und Personalwesens, was mittelfristig zur Abnahme der spezifischen Fixkosten führt. Eine Vergrößerung des Entsorgungsgebietes steigert zudem die Verhandlungsmacht des Aufgabenträgers nach außen hin, senkt das wirtschaftliche Risiko, führt zu günstigeren Refinanzierungs- und Kapitalkosten sowie dem langfristigen Aufbau von Wissen (Graetz 2008).

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

### 2.3 Finanzwirtschaftliche Anpassungen

Neben der Betriebsführung und organisatorischen Verwaltung der technischen Infrastruktur ist deren Finanzierung ein weiterer wesentlicher gestalterischer Aspekt mit Einfluss auf die Gebührenentwicklung. Über die Gebührenerhebung findet die Deckung der Kosten statt. Deren Ausgestaltung in Form von Mengen- und Grundgebühr kann dabei Anreize für einen höheren Wasserverbrauch oder für eine gerechtere Verteilung der Kosten schaffen. Ein wesentlicher Kostenfaktor sind die Kapitalkosten, welche sich aus Abschreibungen und Zinskosten zusammensetzen. Mit der Anschaffung oder Reinvestition von Sachanlagenwerten fallen direkt Abschreibungen an. Diese lassen sich durch die Gestaltung von Abschreibungsart und -dauer in ihrer Höhe verändern. Die Zinskosten ergeben sich aus der Höhe der Verbindlichkeit und der vom Kapitalmarkt vorgegebenen Zinsrate. Somit hat die Art der Kapitalbeschaffung ebenfalls einen maßgeblichen Einfluss auf die Kapitalkosten.

Eine Übersicht über finanzwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen ist in Tabelle 2-3 dargestellt. Dabei handelt es sich um Maßnahmen im Bereich der Finanzierung von Sachanlagenwerte aus Sicht der Kostendeckung als auch um Maßnahmen in der Kapitalbeschaffung.

**Tabelle 2-3:** Anpassungsmaßnahmen im finanzwirtschaftlichen Bereich

Anpassungsmaßnahme	Kurzbeschreibung	Bereich	Zeit- horizont
Anpassung der Gebührenstruktur	Vermeidung des Verbrauchsverhaltens bei Kostensteigerungen durch Erhöhung der Grundgebühr	F	K
	Gerechtere Gebührenverteilung zwischen den Haushalten durch Veränderung des Gebührenmaßstabs		
	Tarifstruktur für fragmentierte Siedlungsgebiete		
Anpassung der Abschreibung	Anpassung der Abschreibungsdauer	KB	
	Anpassung Abschreibungsart an die Bevölkerungsentwicklung, (degressive Abschreibung)		
Novellierung des Abwasserabgabengesetz	Herabsetzung der Erheblichkeitsschwelle der Schadstoffreduktion für die Verrechnung mit der Abwasserabgabe		
	Schaffung von Transparenz bei der Mittelverwendung		
Beiträge für Erneuerung	Erweiterung der verrechnungsfähigen Maßnahmen		
	Refinanzierung des Schmutzwassersystems durch erneute Beitragserhebung (hierfür Anpassung der KAG der Länder) für angeschlossene Grundstücke		
Sicherung niedriger Zinssätze	Zinssicherungsinstrumente	KB	
Anderweitige Kapital- beschaffung (Sonder- finanzierungsmodelle)	Bürgeranleihen, Environmental Impact Bonds, Cross-Border-Leasing (der Vollständigkeit genannt, keine Empfehlung)		

F: Finanzierung, KB: Kapitalbeschaffung, K: Kurzfristig (< 5Jahre)

Gebührensteigerungen erfolgen zum einen durch den Anstieg der Gesamtkosten und zum anderen durch die Kostenumverteilung bei sich reduzierender Bevölkerungszahl. Die Kostenumverteilung ergibt sich aus der sinkenden Jahresabwassermenge, welche der Bezugsmaßstab für den verbrauchsabhängigen Gebührenbestandteil ist. Durch die Steigerung der verbrauchsabhängigen Mengengebühr wird von Seiten der Einwohner versucht, die Mehrkosten durch Wassereinsparung zu kompensieren. Dies wiederum verschärft den Effekt der Kostenumlage und führt zu weiter steigenden Gebühren. Dem

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

kann durch eine geschickte Gebührengestaltung entgegnet werden, in dem die Kostensteigerung auf die Grundgebühr umverlegt wird. Somit wird kein Anreiz für eine Verbrauchseinsparung geschaffen (Hubner 2014). Unabhängig davon führt die Grundgebühr zu einer ungleichen Belastung der Haushalte. Dies ist der Bemessungsgröße geschuldet, welche überwiegend die Wasserzählergröße ist. Ausgehend von der Standardzählergröße (Qn 2,5) führt dies zur gleichen Grundgebührenbelastung von Familienhäusern und der eines Wohnblocks, weil dieser über die gleiche Zählergröße verfügt. Jedoch wird die Grundgebühr beim Wohnblock durch viele Haushalte geteilt. Auf diese Weise werden Haushalte in kleineren Wohngebäuden um ein Vielfaches mehr belastet. Ein gerechterer Bemessungsmaßstab für die Grundgebühr ist nach Hubner (2014) der Personenmaßstab. Da ein Wechsel des Gebührenmaßstabes zu einer Kostenbelastungsverwerfung der Haushalte und dies zu Unmut der Gebührenzahler führen würde, ist ein modifizierter Personenmaßstab, wie im Landkreis Sonneberg eingeführt, praktikabler. Beim modifizierten Personenmaßstab setzt sich die Grundgebühr aus einem festen Betrag für das angeschlossene Grundstück (inklusive einer Person) und einen zusätzlichen Betrag für jede weitere Person zusammen (Hubner 2014). Mit einer gerechteren Gebührengestaltung werden Gebührenerhöhungen durch Kostensteigerungen oder Kostenumverteilung durch eine Bevölkerungsabnahme gleichmäßiger auf alle Einwohner verteilt.

In stark fragmentierten Siedlungsstrukturen im ländlichen Raum oder in Siedlungsgebieten im suburbanen Raum (Vororte) kommt es zur Querfinanzierung zwischen Gebieten mit höherer und geringer Siedlungsdichte. Dichter besiedelte Gebiete führen im Bereich der Ver- und Entsorgung zu geringeren einwohnerspezifischen Kosten, umgekehrt verhält es sich bei dünnbesiedelten Gebieten. Durch das Solidarprinzip werden die Kosten im Aufgabenträgergebiet i.d.R. gleichmäßig auf alle angeschlossenen Einwohner verteilt. Ob dabei von Gebührengerechtigkeit gesprochen werden kann, ist in der Fachwelt umstritten, weshalb unter anderem Tarifzonen bei der Gebührenerhebung gefordert werden. Die Entkopplung des Solidarprinzips führt aber zu keiner Entschärfung des Problems der steigenden Kosten und führt lediglich zu einer anderen Form der Kostenumverteilung.

Einen großen Einfluss auf die Gesamtkosten haben Abschreibungen (ca. 28 % der Gesamtkosten, DWA 2014). Grundsätzlich besteht eine Abschreibungspflicht von wertmindernden Sachanlagenwerten. Die Abschreibungshöhe wird durch die Art der Abschreibung und der Abschreibungsdauer festgesetzt. Für die Abschreibungsdauer gibt es in Form von AfA - Tabellen Vorgaben in einer Ermessensspanne, so auch im Bereich der Abwasserwirtschaft durch die Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Lange Abschreibungsdauern senken die jährlichen Abschreibungen. Bei einer Abschreibungsdauer, welche der Tilgung entspricht, ist der Sachanlagewert zum Ende der Nutzungsdauer abgeschrieben. Eine bewusste Abschreibungspolitik mit verringerter Abschreibungsdauer vermeidet nicht nur Buchverluste, sondern kann zu Finanzierungseffekten führen, in dem die Abschreibung höher ausfällt als die Tilgung. Dies bedingt jedoch eine konsequente Reinvestitionsstrategie zur Beibehaltung oder Erhöhung der Abschreibungen (Bellefontaine und Breitenbach 2008). Aufgrund der langen Abschreibungsdauern von Kanalnetzen führt eine sich verringernde Bevölkerung zu einer ungleichmäßigen Belastung bei den Abschreibungen. Um die Belastung durch die Abschreibung generationsgerecht zu verteilen bedarf es höherer Abschreibungsbeträge am Anfang der Abschreibungsdauer, die zum Ende derselben sinken. Diese Art der Abschreibung wird als degressive Abschreibung bezeichnet. Doch ist die Abschreibungsart in den Kommunalabgabengesetzen (KAG)



## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

der Bundesländer festgeschrieben. In den meisten Bundesländern ist nur eine lineare und somit kontinuierliche Abschreibung gestattet. Dabei ist aus wirtschaftlicher Sicht eine degressive Abschreibung gerechtfertigt, denn bei einem höheren Bevölkerungsanteil findet aufgrund der stärkeren Nutzung des Systems ein stärkerer Werteverzehr statt (Hubner 2014). Für die Umsetzung einer generationsübergreifend gerechten Abschreibung wäre eine rechtliche Anpassung der KAG der Bundesländer notwendig.

Zinskosten machen ca. 17 % der Gesamtkosten bei den deutschen Abwasserentsorgern aus (DWA 2014). Deshalb hat die Kapitalbeschaffung ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Kostenentstehung. In Zeiten niedriger Zinsen, wie es aktuell der Fall ist, in denen bereits Kommunkredite zum Nullzins vergeben worden sind, ist die Art und Weise der Kapitalbeschaffung nicht von großer Bedeutung, da durch die Fremdfinanzierung keine Kosten entstehen. Dies ist auch einer der Vorteile einer Querfinanzierung durch Fördermittel, bei welcher für den Fördermittelanteil keine Zinskosten entstehen. Zudem führt die Finanzierung durch Fördermittel für die Verbraucher zu einer Gebührenbegünstigung, weil die Fördermittel gebührenmindernd aufgelöst werden. Dies hat den Effekt, dass dem Verbraucher nicht die gesamten Kosten auferlegt werden. Durch die Auflösung wird allerdings der finanzwirtschaftliche Vorteil der Querfinanzierung für den Aufgabenträger konterkariert. Denn bei Reinvestitionen der geförderten Anlagen entfällt ohne eine erneute Förderung die Gebührenminderung, was bei großen Fördersummen zu einem sprunghaften Anstieg der Gebühren führt. Dies betrifft viele Kommunen und Gemeinden in den neuen Bundesländern, welche in den 90' er Jahren für den Ausbau der Abwasserentsorgungssysteme große Fördersummen erhalten hatten. Eine Fortführung der Förderprogramme würde dies umgehen. Doch ist diesbezüglich die Zukunft ungewiss, denn ab 2020 laufen zahlreiche Regeln der Bund-Länder-Finanzbeziehungen (Solidarpakt, Länderfinanzausgleich, EU-Strukturfond) aus und sind neu zu verhandeln. Investitionszuschüsse zur Förderung von Maßnahmen für die Erhaltung oder Verbesserung der Gewässergüte werden weiterhin aus dem Fördertopf der Abwasserabgabe, welche durch das Abwasserabgabengesetz (AbwAG) instrumentalisiert ist, zur Verfügung stehen. Die lenkungszweckgebundene Mittelverwendung und -vergabe ist Ländersache, so können z.B. in Nordrhein-Westfalen für die Ertüchtigung kommunaler KA bis zu 70 % der Kosten mittels Investitionskostenzuschüssen gefördert werden (MRI NRW 2017). Eine weitere Möglichkeit der indirekten Förderung ist die Verrechnung der Kosten für die Errichtung oder Erweiterung der Anlage mit der Abwasserabgabe nach § 10 Abs. 3 AbwAG. Auf diese Weise können die entstandenen Aufwendungen mit der geschuldeten Abgabe für den Zeitraum von drei Jahren vor der Inbetriebnahme verrechnet werden. Damit die Verrechnung erfolgen kann, ist durch die Maßnahme eine Reduzierung der Fracht hinsichtlich einer der bewerteten Schadstoffe bzw. Schadstoffgruppen um 20 % im Teilstrom als auch eine Minderung der Gesamtschadstofffracht zu erzielen. Doch ist die Erheblichkeitsschwelle für die Reduktion von mindestens 20 % der Schadstofffracht aufgrund der ohnehin bereits geringen Frachten durch den technischen Stand der Anlagen nur selten zu erreichen. Aus diesem Grund wird von Seiten der wasserwirtschaftlichen Interessensverbände als auch von Gawel et al. (2014) eine grundlegende Novellierung gefordert. Unter anderem sollte in Bezug auf die Realisierbarkeit der Schadstofffrachtreduktion die Erheblichkeitsschwelle auf 10 % gesenkt werden. Zudem wird mehr Transparenz bei der Mittelvergabe gefordert und dass unter Einbeziehung neuer

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

Maßnahmenbereiche die Mittel der Abwasserabgabe hauptsächlich für siedlungswasserwirtschaftliche Maßnahmen verwendet werden (Gawel et al. 2014, ZUSIE 2013).

In Zeiten hoher Zinsen ist eine zinskostenfreie Form der Kapitalbeschaffung die Erhebung von Anschlussbeiträgen. Dabei handelt es sich um einmalige Entgelte Nutzungsberechtigter, welche der Deckung des Aufwandes zur Anschaffung und Herstellung von öffentlichen leitungsgebundenen Infrastrukturen (u.a. Abwasserentsorgungsanlagen) dienen. Die Beiträge können als zinsloses Darlehen bezeichnet werden, da der Aufgabenträger die erhobenen Beiträge dem Nutzer durch eine Gebührenminderung zurückerstattet. Hierfür werden die Beitragssummen über die mittlere Nutzungsdauer des gesamten Abwasserentsorgungssystems (i.d.R. 40 Jahre) aufgelöst. Im Gegensatz zu den Straßenbaubeiträgen dürfen Anschlussbeiträge in den meisten Bundesländern nicht für die Verbesserung, Erweiterung oder Erneuerung erhoben werden. Dies wird im Sinne der zinsfreien Kapitalbeschaffung als Nachteil gesehen, da bei den Beiträgen beide Seiten, der Aufgabenträger als auch der Nutzer des Systems profitieren. Durch eine Finanzierung der Reinvestitionen des Abwasserentsorgungssystems lässt sich der größte Teil der Zinskosten reduzieren. Hierfür bedarf es jedoch der rechtlichen Anpassung der KAG der Bundesländer.

Bei der Fremdfinanzierung mittels Kapitalbeschaffung am Kapitalmarkt bestimmt der Darlehenszinssatz die Höhe der Kosten für den Kredit. Hinsichtlich des schwankenden Darlehenszinssatzes in der Vergangenheit ist es erstrebenswert, Investitionen zu niedrigen Zinssätzen zu tätigen. Doch lassen sich die Marktphasen und die damit einhergehenden Zinsinflüsse über den langfristigen Planungshorizont der Anlagenkomponente und Kanäle nicht berücksichtigen. Neu- und Reinvestitionen werden in Abhängigkeit von den Nutzungsdauern und Objektzuständen getätigt. Im Sinne einer Investitionsstrategie können unter Berücksichtigung des Objektzustandes durch Reparaturen kostenintensive Sanierungen und Erneuerungen zeitlich verzögert werden. Dies führt jedoch zu einem sogenannten Investitionsstau. Mit dieser Verzögerungstaktik wird jedoch generell angestrebt, die Investitionen der abgestimmten Beitragsentwicklung anzupassen. Doch ergibt sich dadurch auch ein kleines Zeitfenster, in welchem die Volatilität der Zinsentwicklung ausgenutzt werden kann (wenn auch nur im geringen Maße). Da die Investitionen im infrastrukturellen Bereich der Abwasserwirtschaft oft mehrere Millionen betragen, hat selbst der kleinste Zinsschritt einen großen Einfluss auf die Zinskosten. Die aktuelle Phase des „billigen Geldes“ durch die Nullzinspolitik ist prädestiniert für große Fremdkapitalsummen. Bei Sachanlagewerten, deren Refinanzierung zum späteren Zeitpunkt anstehen, kann sich die Zinspolitik bereits gewandelt haben. Um von den gegenwärtigen Zinssätzen auch in Zukunft zu profitieren lohnt es sich, in Zinssicherungsinstrumente zu investieren. Mittels dieser Instrumente lassen sich die Zinsen für längere Zeiträume absichern. Für diese Absicherung entstehen zwar Kosten, die sich bei steigenden Zinssätzen allerdings rentieren.

Neben der Kapitalbeschaffung über Kreditinstitute existieren noch weitere Sonderfinanzierungsmodelle, welche in Zeiten hoher Darlehenszinssätze geringe Zinskosten verursachen. Eine alternative Finanzierungsform sind Bürgerkredite, hier wird das Fremdkapital mit einer festen Verzinsung (welche unter den üblichen Kommunalдарlehenszinssätzen liegt) bei Privatpersonen aufgenommen. Die Abwicklung erfolgt über eine Bank, denn für Einlagengeschäfte bedarf es in Deutschland nach

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

Kreditwesengesetz (§1 Abs.1 Satz 2 Nr. 1 KWG) einer Banklizenz. Eine weitere Kapitalbeschaffungsmaßnahme sind Wirkungskredite, auch bekannt als Impact Bonds. Neben den bekannten Social Impact Bonds (SIB) gibt es im Umweltbereich die Environmental Impact Bonds (EIB) für Projekte mit Bezug auf grüne Infrastrukturen. Grundsätzlich sind EIB mit „grünen Anleihen“ (engl. Green Bonds) nicht zu verwechseln, denn EIB sind keine Anleihen oder eingetragene Finanzinstrumente. Stattdessen handelt es sich um Verträge unter dem Aspekt „Pay-for-Performance“. Die finanzielle Rendite der Investoren ergibt sich aus der erbrachten Leistung des Projektes. Hierfür werden vorab Kriterien und Ziele vereinbart. Dementsprechend resultiert nur bei Erfüllung der Ziele eine Rendite, welche sich u.a. aus den zukünftigen erzielten Kosteneinsparungen ergeben kann. Hierfür wird zwischen öffentlicher Verwaltung und privaten Investoren eine Wirkungspartnerschaft gebildet, die von einem Intermediär verwaltet und von einem Gutachter evaluiert wird (Voica et al. 2015, Nicola 2013). Der erste EIB mit einem Volumen von 25 Mio. \$ wurde 2016 mit der DC Water (Columbia, USA) abgeschlossen, einen öffentlich-privaten Aufgabenträger der Siedlungswasserwirtschaft (U.S. EPA 2017).

Eine sehr umstrittene Art der indirekten Kapitalbeschaffung durch Leasingverträge ist das sogenannte Cross-Border-Leasing (CBL). An dieser Stelle soll es nur der Vollständigkeit halber aufgeführt sein, da viele solcher Verträge seit den 90'er Jahren von den Kommunen in Deutschland, Niederlande, Dänemark, Österreich, England, Schweden und der Schweiz abgeschlossen wurden. Dem Namen ist zu entnehmen, dass es sich um einen Vertrag zum Zwecke des Leasings (Vermietung bzw. Verpachtung) handelt, der über die Ländergrenzen hinweg Bestand hat. Diese spezielle Art von Leasing mit einem sich dahinter verbergenden Steuerumgehungsmodell wurde in den 70'er Jahren in den USA entwickelt. Der komplexe Vertrag wird zwischen US-amerikanischen und europäischen Finanzinstituten, Anwalts- und Ingenieurbüros, Ratingagenturen und den Kommunen abgeschlossen. Mit der Abschaffung des Vertragstyps „verkaufen und zurück mieten“ im Jahr 1999 existierte von da an bis 2004 nur noch der Vertragstyp „mieten und Servicevertrag“. Bei diesem Vertragstyp wurden die Sachanlagenwerte für 100 Jahre vermietet und für 30 Jahre an die Kommune zurückvermietet. Eine Übereignung an den Investor in Form eines Grundbucheintrages findet nicht statt. Denn nach nationalem Recht unterliegen die öffentlichen Sachanlagewerte dem Recht des Lageorts, von welchem auch durch eine andere Rechtswahl (z.B. amerikanischem Recht) nicht abgewichen werden kann (Rügemer 2005). Begründet darin, dass wirtschaftliches Eigentum (steuerrechtlicher Begriff) nicht an den Gegenstand an sich gebunden ist, kann es in Abhängigkeit von den geltenden Rechtsvorschriften auch an zwei Orten bzw. Ländern vorliegen und somit von beiden Seiten abgeschrieben werden. Gemäß Vertrag zahlt der Investor einmalig zu Vertragsbeginn die volle Mietsumme für die gesamte Vertragslaufzeit (Kaufpreis) und wird zum Hauptmieter des Sachanlagewertes. Aufgrund der langfristigen Mietzeit wird der Sachanlagenwert als wirtschaftliches Eigentum in die Vermögensbilanz des Investors aufgenommen, welcher diesen somit in den USA abschreiben kann. Die Kommune bleibt dennoch eingetragener Eigentümer des Sachanlagewertes. Nach Ablauf der 30 Jahre bestehen für die Kommunen die Optionen der Vertragskündigung, wobei der Vertrag erlischt und ein Ablösebetrag fällig wird. Als zweite Option besteht die Fortführung in Form eines Dienstleistungsvertrages, bei welchem der Investor für die restlichen 70 Jahre einen privaten Betreiber einsetzt. Mit dem im CBL-Vertrag integrierten Dienstleistungsvertrag wird der Investor vom kostendeckenden Wirtschaften entbunden und darf gewinnorientiert wirtschaften. Die Verträge unterliegen ausschließlich US-Recht

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

und schließt die Sonderrechte einzelner US-Staaten mit ein. Darin begründet ist der Sitz der Investoren grundsätzlich im US-Staat Delaware, der bedeutendsten Finanzoase in den USA mit wirtschaftlichen Sonderregelungen (Rügemer 2004). Als Gerichtsort wird in allen Verträgen New York festgesetzt. Dies hat die Bewandnis, dass in diesem Staat die Verträge auch dann ihre Gültigkeit bewahren, wenn diese gegen US-Bundesrecht verstoßen (Kirbach 2009, Rügemer 2004). Bei diesem Vertragsgeschäft gibt es viele Profiteure, spezialisierte Finanztöchter von Banken die als Makler zwischen Investoren (Privatpersonen und Institutionen die sich in einem Trust zusammenschließen) und Kommunen fungieren, Wirtschaftskanzleien welche die Verträge für Millionenbeträge verfassen, Wirtschaftsprüfern für die Gestaltung der Steuermodelle, den Investoren und die Kommunen. Die größten Profiteure dieser Scheintransaktionen sind Banken, denn sie verdienen zum einen an Zinsen als Darlehensgeber für den Trust, da sich dieser i.d.R mit nur 15 % Eigenkapital beteiligt (75 % des Kaufpreises als Darlehen) und als Schuldübernahme- und Depotbank, welche 95 % des Kaufpreises von der Kommune erhalten und somit ein zinsloses Darlehen bekommen, mit welchem sie wirtschaften können. Von den 95 % des Kaufpreises werden 80 % an eine Schuldübernahmebank, die über die Vertragslaufzeit die Leasingraten der Kommune an den Trust zahlt und weitere 15 % an eine Depotbank transferiert, welche das Kapital für die Ablösesumme verwaltet. Die Investoren des Trusts profitieren von den jährlichen Steuererminderungen in den USA durch die Abschreibung der Sachanlagewerte und der steuerlichen Anrechnung der Zinskosten für die Darlehen. Daraus ergibt sich eine jährliche Steuerersparnis von ca. 10 % des Kaufpreises, was bei einer Laufzeit von 30 Jahren eine Gesamtrendite von 300 % bedeutet (Wittmann 2009, Rügemer 2005, 2004). Zudem profitieren sie von der Ablösesumme nach 30-jähriger Laufzeit und der Entschädigungszahlung bei Vertragsbruch. Am geringsten profitieren die Kommunen, sie erhalten 4 % bis 5 % des Kaufpreises, den sogenannten Barwertvorteil, der einem Anteil der jährlichen Steuerentlastung der Investoren entspricht und zu Vertragsbeginn ausgezahlt wird. Dem geringen Profit für die Kommunen stehen allerdings immense Nachteile gegenüber. Denn obwohl die Kommune in diesem Vertragskonzept nach dem Abschluss keine wesentliche Rolle hat, tragen die Kommunen das volle Risiko des Finanz-/ Vertragsgeschäftes. Gegenüber den Investoren stehen sie ein für sämtliche Zahlungsverpflichtungen als auch für die Risiken bezüglich Steuerrechtsänderungen in Europa. Bei Vertragsverletzung (z.B., wenn der vereinbarte Wert des Sachanlagewertes sinkt und zur Minderung der steuerlichen Abschreibung führt) sind die Investoren berechtigt, Schadensersatz zu verlangen. Um die komplexen Vertragspflichten einzuhalten, bedarf es eines kostenintensiven Vertragscontrollings, das unter Umständen den Barwertvorteil über die Jahre vollständig aufzehrt. Ferner haften die Kommunen auch für die Bonität der Banken. Im Falle einer Senkung im Bonitätsranking der vertraglich involvierten Depotbank sind die Kommunen verpflichtet, durch einen Bankenwechsel die Sicherheit wiederherzustellen oder durch den Kauf von Staatsanleihen nachzubesichern. Ohne Wiederherstellung der im Vertrag garantierten Sicherheiten, wird der Ablösebetrag fällig. Es wird vermutet, dass von den amerikanischen Vertragspartnern bewusst auf Störungen des geregelten Zahlungsverkehrs spekuliert wurde, um die deutschen Kommunen zu zusätzlichen Absicherungsleistungen zu zwingen (Roberts 2009). Als Vertragsgegenstände wurden zuerst ÖPNV-Infrastrukturen von den Kommunen veräußert, anschließend wurden Ende der 90'er immer mehr die finanziell hochwertigeren Sachanlagenwerte der Wasserver- und Abwasserentsorgung zum vertraglichen Gegenstand. Auf diese Weise wurden im Bereich der

## 2. Anpassungsmaßnahmen zur Kostenreduktion im Bereich der Schmutzwasserentsorgung

---

Wasserversorgung das gesamte Leitungsnetz sowie sämtliche Wasserwerke der Landeswasserversorgung von Baden-Württemberg, der Bodenseewasserversorgung, die Schweriner Wasserversorgung sowie die kommunalen Wasserwerke von Leipzig veräußert. Im Bereich der Abwasserentsorgung wurden in Bochum, Gelsenkirchen sowie Recklinghausen das Kanalnetz, in Dresden und Köln die KA als auch eine der Großkläranlagen der Emschergenossenschaft unter Vertrag gestellt. In Düsseldorf, Königswinter, Leipzig, Mannheim, Nürnberg und Ulm wurden die gesamten Abwasserentsorgungssysteme in einem CBL-Vertrag eingebracht. Insgesamt betragen die bis 2004 in Deutschland schätzungsweise 150 abgeschlossenen CBL-Verträge (Altvater 2004) einen veräußerten Sachanlagenwert in Höhe von 50 Mrd. € (Schiffler 2015). Dabei fallen alleine 50 % des Transaktionsvolumens in Nordrhein-Westfalen an (Wittmann 2009). Seit 2004 ist diese Art von Scheinverträgen in den USA verboten, doch werden in vielen europäischen Ländern solche Verträge immer noch unterzeichnet. In Deutschland wird es gesetzlich gestattet, dass Stiftungen deutscher Unternehmen, staatliche und kommunale Sachanlagen in einem Leasingvertrag mieten und an die Kommunen rückvermieten (Rügemer 2004).

### **3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft**

Für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von Aufgabenträgern der Abwasserwirtschaft unter sich verändernden Rahmenbedingungen werden Instrumente zur Ermittlung der damit verbundenen Herausforderungen und zur Einschätzung von Risiken benötigt. In diesem Kapitel werden die gegenwärtig zur Verfügung stehenden methodischen Ansätze für eine wirtschaftliche und prozessbezogene Betrachtung von KA und Abwasserentsorgungssystemen als auch zur Gesamtunternehmensbewertung aufgezeigt. Basierend auf diesem Gesamtüberblick wird der Bedarf eines ganzheitlichen Ansatzes für eine unternehmensweite wirtschaftlich-technische Betrachtung ermittelt.

#### **3.1 Prozessmodellierung**

##### **3.1.1 Kanalalterungsmodelle**

Als Alterung wird die Verschlechterung des baulichen Zustandes von Entwässerungssystemen bezeichnet. Durch den damit einhergehenden Verbrauch der baulichen Substanz kann es bis zum vollständigen Verlust des Substanzwerts und der damit verbundenen Beendigung der technischen Nutzungsdauer kommen (DWA 2008a). Zur quantitativen Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der baulichen Substanz und des Substanzwertes von Leitungen werden Kanalalterungsmodelle eingesetzt. Anhand von Zustandsklassen findet in diesen Modellen eine Klassifizierung des baulichen Zustandes statt, mittels welcher der Gesamtzustand von Haltungen und der resultierende Sanierungsaufwand ermittelt werden. Diese Modelle werden als Entscheidungssysteme für Sanierungsstrategien angewandt und tragen zur Senkung der Gesamtinstandhaltungskosten bei. Zudem können mittels dieser Modelle Kanalinspektionsplanungen optimiert werden (Marlow et al. 2009). Kanalalterungsmodelle lassen sich in physikalische, statistische und auf künstlicher Intelligenz basierende Modelle unterscheiden (Yang 2004). Die physikalischen Modelle werden nach Rajani und Kleiner (2001) zusätzlich in deterministische und probabilistische Modelle unterteilt. Deterministische Modelle bewerten quantitative Zusammenhänge zwischen den Alterungsfaktoren und dem Zustand der Abwasserleitungen anhand von mechanistischen (z.B. König 2005) oder empirischen Ansätzen (z.B. Rajani und Makar 2000, Randall-Smith et al. 1992, Doleac et al. 1980). Die Beschreibung der Alterungsprozesse findet durch Gleichungen ohne Zufallsvariablen mit wahrscheinlichkeitstheoretischen Bezügen statt (Kley und Caradot 2013, Marlow et al. 2009). Probabilistische Ansätze (z.B. Hadzilacos et al. 2000, Pandey 1998, Linkens et al. 1998, Hong 1997, Jones 1997a, 1997b, Ahammed und Melchers 1994, Stephens 1994a, 1994b) bilden die physikalischen und chemischen Prozesse anhand von historischen Daten unter Verwendung von wahrscheinlichkeitsbasierten Gleichungen ab. Physikalische Modelle können die Prozesse, welche zu Rohrschäden bzw. -brüchen führen, durch die Art des Materials, Wechselwirkungen mit dem Boden, die Qualität der Verlegung, interne Belastungen durch operative Prozesse sowie externe Belastungen durch Bodenüberdeckung, Verkehr und Frost als auch Materialalterung durch externe und interne chemische, biochemische und elektrochemische Prozesse beschreiben. Zur modellseitigen Berücksichtigung dieser Prozesse bedarf

### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft

---

es einer Vielzahl von Parametern, wie Informationen über das Rohr bzw. den Kanal: Material, Durchmesser, Wanddicke, Installationsdatum, Verlegungstiefe; Beschaffenheit des Bodens: Bodenart, pH-Wert, Dichte, Sauerstoffgehalt; Installationsdaten: Lagebedingungen, Belastungsfaktor, Koeffizient der Horizontalbelastung im Ruhezustand, Gleitreibungskoeffizient und Betriebsbedingungen: Wasserdruk, Druckstöße, Sommer-, Winter- und Wassertemperaturen, Fahrzeugbelastungsfaktor, Frostlastfaktor (Kley und Caradot 2013, Ana et al. 2009, Marlow et al. 2009, Tran et al. 2007, Rajani und Kleiner 2001, Davies et al. 2001).

Im Gegensatz zu den physikalischen Modellen beschreiben die statistischen Alterungsmodelle nicht die Mechanismen, welche zur Zustandsverschlechterung bzw. Rohrschäden führen, sondern betrachten die Zustandsveränderung anhand von historischen Daten aus Kanalinspektionen unter Verwendung von wahrscheinlichkeitsbasierten Gleichungen. Dabei lassen sich nach Ana und Bauwens (2010) die statistischen Modelle grob in Rohrleitungs- und Rohrgruppenmodelle unterteilen. Bei Rohrleitungsmodellen werden die individuellen Eigenschaften und Merkmale der einzelnen Rohrleitungen bei der Prädiktion der Zustände berücksichtigt. Rohrgruppenmodelle betrachten ganze Netze oder Kohorten, welche Teile des Netzes desselben Alters und ähnlicher Merkmale (Material, DN) zusammenfasst (Ana und Bauwens 2010, Baur und Herz 2002). Zusätzlich lassen sich die statistischen Alterungsmodelle nach Art der Berechnungsansätze kategorisieren. In Anlehnung an die physikalischen Modelle können die statistischen Modelle nach Kleiner und Rajani (2001) ebenfalls in deterministische und probabilistische Modelle unterteilt werden. Die deterministischen Modelle werden in zeitexponentielle (z.B. Jacobs und Karney 1994, Kettler und Goulter 1985, McMullen 1982) und zeitlineare Modelle (z.B. Mavin 1996, Clark et al. 1982, Walski und Pelliccia 1982, Shamir und Howard 1979) untergliedert. Diese Ansätze beschreiben den zeitlichen Einfluss auf den Kanalzustand. Probabilistische Modelle werden bei den statistischen Ansätzen in Single-Variate-Gruppenmodelle und in Multi-Variate-Modelle untergliedert. Zu den Single-Variaten-Gruppenmodellen gehören die Kohorten-Überlebensmodelle (z.B. Baur et al. 2004, Herz 1996), Semi-Markov-Modelle (z.B. Le Gat 2008, Baik et al. 2006, Micevski et al. 2002, Kleiner und Rajani 2001, Wirahadikusumah et al. 2001, Gustafson und Clancy 1999), Bayes'sche Diagnosemodelle (z.B. Kulkarni et al. 1986), Break-Clustering-Modelle (z.B. Goulter et al. 1993, Goulter und Kazemi 1988) als auch Ansätze mittels logistischer Regressionsanalyse (z.B. Ariaratnam et al. 2001) und der Multiplen-Diskriminanzanalyse (z.B. Tran et al. 2006). Die Multi-Variaten-Modelle lassen sich des Weiteren in proportionale Gefährdungsmodelle (z.B. Brémond 1997, Andreou et al. 1987a, 1987b, Marks et al. 1987, Marks und Jeffrey 1985), zeitabhängige Poisson-Modelle (z.B. Constantine und Darroch 1995, Constantine und Darroch 1993) und beschleunigte Lebenszeitmodelle (z.B. Eisenbeis et al. 1999, Lei 1997) unterteilen.

Auf künstlicher Intelligenz basierende Modelle sind datengetrieben. Zu ihnen zählen unter anderem neurale Netzwerke (z.B. Tran et al. 2006), Fuzzy-Set-Theorie Modelle (z.B. Kleiner et al. 2006) und regelbasierte Simulationen (z.B. Ruwanpura et al. 2004). Unter einem künstlichen neuronalen Netzwerk wird eine Ansammlung von einzelnen informationsverarbeitenden Einheiten (Neuronen) verstanden, welche in Layer schichtweise in einer Netzarchitektur strukturiert und in einer Hierarchie miteinander verbunden sind. Mit Hilfe von neuronalen Netzwerken werden mathematische Beziehungen zwischen Prädiktoren (unabhängigen Variablen: Alterungsfaktoren) und Rückmeldungen (abhängigen Variablen: Zustandsklassen) untersucht. Dabei findet der Lernprozess des

### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft

neuronalen Netzwerkes in Bezug auf das Alterungsverhalten von Abwasserleitungen ohne Annahmen anhand von Prüfdaten statt (Tran et al. 2007). Bei der Fuzzy-Set-Theorie werden unscharfe Datenmengen (Fuzzy-Sets) durch den Grad ihrer Zugehörigkeit zueinander mittels Zugehörigkeitsfunktionen definiert, welche jedem Element einen numerischen Wert als Zugehörigkeitsgrad zuordnet. Anhand der Mengenoperationen werden die Operationen des zugehörigen Logikkalküls definiert, was die Modellierung von Inferenzprozessen ermöglicht. Diese Modelle können unter Verwendung der Kenntnisse zur technischen Beurteilung und der Erfahrung des Nutzers verwendet werden, um die Alterung von Leitungen vorherzusagen (Marlow et al. 2009). Dabei werden qualitative (linguistische) Beschreibungen von Alterungsfaktoren in Fuzzy-Zahlen konvertiert. Basierend auf den Logikkalkülen (Regeln), welche das Wissen über die Mechanismen der Kanalarterung und die Folgen des Kanalversagens beinhalten, erfolgt die Zusammenfassung der Fuzzy-Eingaben zu Fuzzy-Ausgaben. Liegen nur wenige Datensätze und Informationen in qualitativen Ausdrücken vor, sind diese Modelle besonders zur Vorhersage der Kanalarterung geeignet. Regelbasierte Modelle enthalten Regelsätze, welche indirekt ein mathematisches Modell spezifizieren. Die Regelsätze können in ein Modell (z.B. Markov-Ketten) sowie in Differentialgleichungen integriert oder durch Werkzeuge genutzt werden, welche direkt mit dem Regelsatz anstelle eines implizierten Modells arbeiten. Im Falle, dass die Regelsätze eine einfachere Struktur haben als das implizierte Modell ist dieser Modellansatz vom Vorteil (Kleiner et al. 2006).

Die genannten unterschiedlichen Ansätze für die Ermittlung der Kanalzustandsveränderung in Form von Kanalarterungsmodellen lassen sich nach Yang (2004), Rajani und Kleiner (2001) und Kleiner und Rajani (2001) wie in Abbildung 3-1 dargestellt methodisch zuordnen.

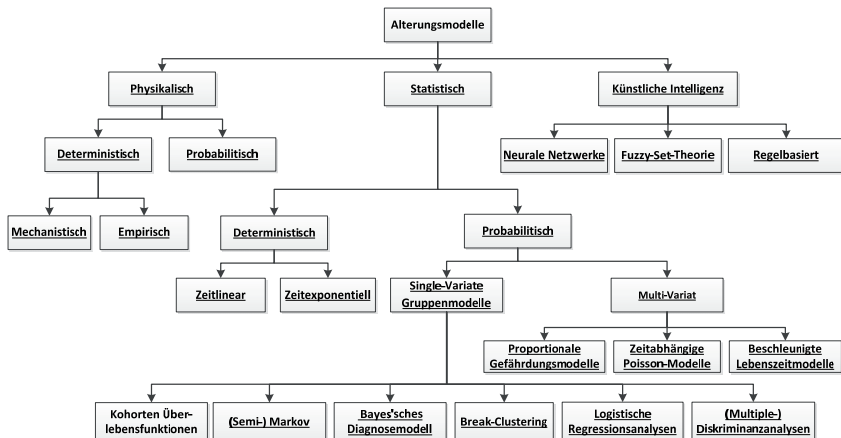


Abbildung 3-1: Überblick methodischer Ansätze der Kanalarterungsmodellierung



Die Vielzahl an Modellen unterscheiden sich in ihrer mathematischen Beschreibung des Alterungsprozesses, den Datengrundlagen und der Art der Kalibrierung (Scheidegger et al. 2011). Hinsichtlich der Vielzahl an Modellansätzen zur Beschreibung von Alterungsprozessen findet in dieser Arbeit keine separate Erläuterung statt. Stattdessen werden die Modellvergleiche aus den Studien von Kley und Caradot (2013), Ana und Bauwens (2010), Rajani und Kleiner (2001) und Kleiner und Rajani (2001) herangezogen, um einen Überblick über die Vor- und Nachteile der Modellarten zu geben. Physikalische Modellansätze können die komplexen, zum Teil noch nicht ganz verstandenen Mechanismen der Alterungsprozesse nur vereinfacht und hinreichend abbilden. Die Anwendbarkeit dieser Modelle wird zudem durch die eingeschränkte Verfügbarkeit an Daten limitiert (Schmidt 2009, Tran et al. 2007, Rajani und Kleiner 2001). Auf künstliche Intelligenz beruhende Modelle sind in der Lage, komplexe Sachverhalte zu lösen, welche nicht durch analytische oder physikalische Modelle beschrieben werden können. Mittels dieser Modelle lassen sich Kausalzusammenhänge dennoch lediglich begrenzt identifizieren (Ana et al. 2009, Tu 1996). Nach Mehle et al. (2001) lässt sich die Kanalarterung aus einer Kombination von probabilistischen Gleichungen und empirischen Daten zur Bewertung des strukturellen Zustands der Leitungen über die Lebensdauer am besten prognostizieren. Bezüglich der Einteilung der statistischen Modelle in Rohrleitungs- und Rohrgruppenmodelle, besitzen die Rohrleitungsmodelle die exakteren Ansätze zur Modellierung von Kanalzuständen für einzelne Haltungen, doch sind diese Modelle gegenwärtig noch nicht ausgereift. Für die Zustandsbewertung von ganzen Kanalnetzen, der Entwicklung von Sanierungsstrategien sowie der Abschätzung von zukünftigen Instandhaltungskosten eignen sich insbesondere die Rohrgruppenmodelle (Ana und Bauwens 2010). Die Diskriminanz- und logistische Regressionsanalyse besitzen nur eine geringe Prädiktionsgenauigkeit (Ana et al. 2009, Ens 2012, Salman 2010, Tran et al. 2007). Bei der Diskriminanzanalyse ist dies durch nicht gültige Annahmen bezüglich der Normalverteilung von Modellinputparametern bedingt. Und bei der logistischen Regressionsanalyse ist es u.a. durch die Anzahl an Datensätzen für die einzelnen Zustandsklassen bedingt, wodurch keine tendenzielle Verteilung feststellbar ist und nicht ausreichend Daten zur Bestimmung der Alterungsvektoren vorliegen (Ana et al. 2009). Das Bayes'sche Diagnosemodell als auch das Break-Clustering-Modell eignen sich nicht zur Analyse von langen Zeiträumen und somit nicht für Instandhaltungsstrategien. Eher eignen sich diese Modelle zur Analyse und als Entscheidungssystem hinsichtlich Reparaturen und Erneuerungen in kurzen Zeitintervallen (Rajani und Kleiner 2001). Zur Vorhersage der Kanalarterung für lange Zeiträume existieren viele Markovsche-Ansätze. Eine sogenannte Markov-Kette repräsentiert einen zeitdiskreten stochastischen Prozess, bei dem die bedingte Wahrscheinlichkeit des zukünftigen Zustands ausschließlich vom aktuellen Zustand abhängt (Ross 2014). Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten können zeitunabhängig (homogene Modelle) oder zeitabhängig (nicht-homogene Modelle) sein. Durch die Abhängigkeit der Kanalzustände vom Alter werden zur zeitabhängigen Beschreibung der Prozesse nicht-homogene Markov-Modelle angewandt (Ana und Bauwens 2010, Kleiner und Rajani 2001). Für die Beschreibung der Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten sind alle Prozesse, welche die zukünftige Zustandsentwicklung beeinflussen zu berücksichtigen (Kley und Caradot 2013). Findet im Modell zudem die Berücksichtigung der bereits im aktuellen Zustand verbrachten Zeit statt, werden diese Ansätze als Semi-Markov-Modelle bezeichnet (Dirksen und Clemens 2008). Dabei wird angenommen, dass die in jedem Kanalzustand verbrachte Zeit zufällig und unabhängig verteilt ist (Ana und Bauwens 2010, Kleiner und Rajani 2001, Lawless 2003).

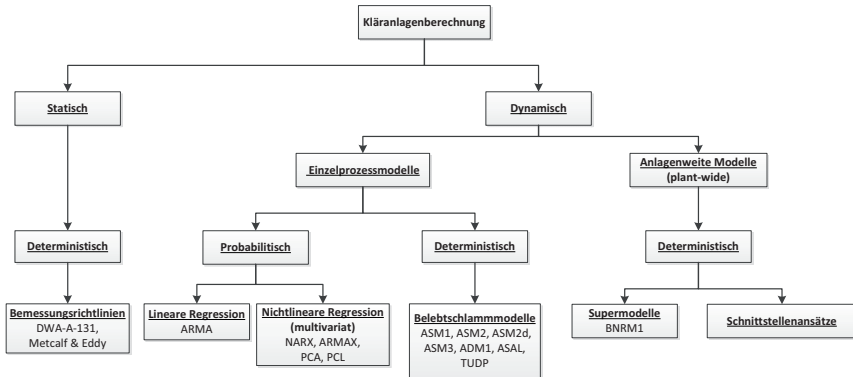
Kohortenüberlebensmodelle beschreiben den Alterungsprozess von homogenen Kanalgruppen, deren Alterungsprozesse durch Übergangsfunktionen mittels Alterungsvektoren beschrieben werden. Der verbreitetste Ansatz ist das Kohortenüberlebensmodell nach Herz (1996) mit den Hertz-Überlebensfunktionen. Anhand einer vergleichenden Untersuchung verschiedener mathematischer Verteilungen für Alterungsprozesse konnte Trujillo (1995) nachweisen, dass die Herz-Verteilung im Vergleich zur Normalverteilung, logarithmischen Normalverteilung, Exponentialverteilung und Weibullverteilung den Alterungsprozess von Infrastrukturelementen am realistischen abbildet. Im Gegensatz zu den Markov-Modellen kann das Herz-Überlebensmodell bei der Kalibrierung der Überlebensfunktionen keine kanalspezifischen Kovariaten (zusätzliche Alterungsvektoren als Parameter der Überlebensfunktionen) berücksichtigen. Ein weiterer Unterschied ist, dass bei den Herz-Überlebensfunktionen Zustandsklassen und keine Zustandswahrscheinlichkeiten als Ergebnis ausgegeben werden (Kley und Caradot 2013, Ana und Bauwens 2010). Nach Ana et al. (2009) ist das Kohortenüberlebensmodell nach Herz (1996) in der Kategorie der Rohrgruppenmodelle hinsichtlich des Pragmatismus und Nutzens der gebräuchlichste Ansatz. Aufgrund der benötigten umfangreichen Datenbestände aus Kanaluntersuchungen zur Erstellung von Kanalgruppen mit gleichen Alterungseigenschaften (Kohorten) sind für diesen Ansatz keine Validierungsergebnisse in der Literatur zu finden. Die vorhandenen raren Datensätze wurden in den Studien zur Kalibrierung der Überlebensfunktionen verwendet. Dadurch wurden auch nicht alle repräsentativen Kanaleigenschaften (Kanalzustände, Alter, Gebietsspezifika) bei der Kohortenbildung berücksichtigt (Ana und Bauwens 2010, Kley und Caradot 2013). Zur Umgehung dieses Problems gewichtete Le Gat (2008) die Daten. Auf diese Weise repräsentierte das Modell den Zustand des gesamten Kanalnetzes im Durchschnitt. In Kap. 4.4.1 wird das Kohortenüberlebensmodell von Herz (1996) eingehender bezüglich des Aufbaus und der Kalibrierung erläutert.

### **3.1.2 Berechnung und Modellierung von Kläranlagenprozessen**

Modelle zur Quantifizierung von KA-Prozessgrößen können grob in statische und dynamische Ermittlungsverfahren unterschieden werden. Die Bemessungsrichtlinien für KA zählen zu den statischen, stationären Verfahren. Anhand dieser erfolgt die Auslegung und Konzeption von KA. Die dynamischen Modelle unterscheiden sich in KA-Modellen, in denen eine anlagenweite Betrachtung (engl. plant-wide) sämtlicher Prozesse in den Verfahrensstufen (VK, Belebung, Nachklärung, Faulung) stattfindet und Belebtschlammmodelle, welche ausschließlich die Prozesse in der biologischen Verfahrensstufe abbilden. Es existieren zwei Ansätze im Bereich der anlagenweiten KA-Modellierung, die sogenannten Supermodelle, welche auf einem Ansatz beruhen und Schnittstellenmodelle, die sich aus mehreren Modellen zusammensetzen und durch Schnittstellen miteinander verbunden sind. Unter anderem sind in Supermodellen Belebtschlammmodelle integriert und enthalten zur Beschreibung weiterer Verfahrensstufen (VK, Nachklärung, Reaktoren, Filter, usw.) weitere Einzelprozessmodelle (engl. unit-process models), welche die jeweiligen Prozesse beschreiben (Barat et al. 2013, Grau et al. 2007).

Eine Einteilung der in diesem Kapitel vorgestellten Berechnungsansätze für KA-Prozesse ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft



**Abbildung 3-2:** Überblick methodischer Ansätze für die Berechnung von KA-Prozessen

Es existiert eine Vielzahl von Bemessungsansätzen für Belebtschlammverfahren, die meisten basieren auf mechanistischen Ansätzen (Tchobanoglous et al. 2013, Grady et al. 2011, WEF 2009, Ekama et al. 1984), welche vereinfachte und modifizierte Versionen der Belebtschlammmodelle (engl. Activated Sludge Model - ASM) der International Water Association (IWA) sind (Henze et al. 2000). Andere Bemessungsansätze (z.B. ATV-DVWK-A131 2000; Ten States Standards 2014) beruhen auf empirischen Gleichungen, bei denen für die Anwendung der Bemessungsverfahren mehr Prozesskenntnisse erforderlich sind. Mittels dieser Ansätze werden Quantifizierungen von Ergebnissen unterschiedlicher Bemessungsvariationen getätigt. Als Eingangsparameter für die Bemessung sind generell Zulaufcharakteristika, Betriebseinstellungen, Sicherheitsfaktoren, kinetische und stöchiometrische Parameter als auch Anforderungen des Ablaufs enthalten. Bemessungsergebnisse umfassen Parameter wie den gelösten Sauerstoffbedarf, das Absetzverhalten, die Volumenanteile (aerob, anoxisch, anaerob), die Dosierungsmengen von Chemikalien (externe Kohlenstoffquellen, Metallsalze, Alkalität) und das Rücklaufverhältnis (Flores-Alsina et al. 2012). Bei den Bemessungsansätzen für Belebtschlammverfahren sind die DWA Richtlinie ATV-DVWK-A131 (2000) bzw. dessen Novellierung DWA-A-131 (2016) und der Ansatz von Tchobanoglous et al. (2013) am weitesten verbreitet. Beide Ansätze basieren auf vereinfachten stationären Annahmen, sind für die Bedingungen gemäßigter Klimazonen in Europa ausgelegt und haben sich über Dekaden bewährt (Walder et al. 2013). Die Bemessungsrichtlinie der DWA findet seit Jahrzehnten in Europa und vor allem in Deutschland Anwendung (Walder et al. 2013, Tchobanoglous et al. 2013, Ekama et al. 1984), während der Ansatz von Tchobanoglous et al. (2013) weitestgehend in angloamerikanischen und asiatischen Regionen angewandt wird (Walder et al. 2013). Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Ansätzen bestand zur früheren Version der DWA Bemessungsrichtlinie der ATV-DVWK-A131 (2000) im betrachteten Zulaufsubstrat. Die ATV-DVWK-A131 (2000) ist ein auf den biochemischen Sauerstoffbedarf (BSB<sub>5</sub>) bezogener Ansatz. Der Bemessungsansatz nach Tchobanoglous et al. (2013) basiert auf dem chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) als Eingangsparameter. Im Vergleich beider Eingangsparameter für die Bemessung liefert der CSB-Ansatz eine detailliertere Charakteristik der

### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft

---

Abwassermatrix, da nicht nur der biologisch abbaubare Anteil berücksichtigt wird (Walder et al. 2013). Im Anhang der ATV-DVWK-A131 (2000) wurde bereits auf einen fraktionierten CSB-Ansatz verwiesen, welcher mit der Novellierung des DWA-Ansatzes in Form des Arbeitsblattes DWA-A-131 (2016) in die Bemessung integriert wurde und den BSB<sub>5</sub>-Ansatz ablöste. Die Integration des CSB in der Bemessung erfolgte, da die Bestimmung des CSB schneller erfolgt und diese weniger fehleranfällig ist im Vergleich zur Bestimmung des BSB<sub>5</sub> (Teichgräber und Hetschel 2016). Die Aufstellung der erforderlichen Gleichungen für die statische Bemessung erfolgte mit dem ASM3 Modell nach (Gujer et al. 1999) und einem Abgleich der Ergebnisse mit Betriebsdaten vorhandener Anlagen. Mittels der Novellierung des Arbeitsblattes DWA-A-131 (2016) ist es möglich, die Anlagenauslegung ohne Widersprüchlichkeiten mit dynamischen Simulationsprogrammen zu verknüpfen (Teichgräber und Hetschel 2016).

Bei den probabilistischen Modellen wird die Beziehung zwischen den Eingangs- und Ausgangsdaten in Form einer daraus abgeleiteten Gleichung beschrieben. Die Datenbeschreibung zwischen Eingangs- und Ausgangsdaten erfolgt mittels autoregressiver gleitender Durchschnitte (engl. Autoregressive Moving Average - ARMA). ARMA sind lineare und zeitdiskrete Regressionen, welche lineare stochastische Prozesse abbilden oder komplexere Prozesse approximieren. Zur Beschreibung von nichtlinearen Prozessen eignen sich neurale Netzwerkmodelle in Form von nichtlinearen autoregressiven exogenen Modellen (engl. Nonlinear Autoregressive Exogenous - NARX) und exogenen autoregressiven gleitenden Durchschnittsmodellen (engl. Autoregressive Exogenous Moving Average - ARMAX) sowie multivariate statistische Ansätze, wie die Hauptkomponenten-Analyse (engl. Principal Component Analysis - PCA) und die partielle Regression der kleinsten Quadrate (engl. Partial Least Squares - PCL).

Die ASM der IWA sind mechanistische, kompakte, auf kinetischen und stöchiometrischen Gleichungen beruhende Modelle, welche zur Bemessung, Optimierung, Kostenevaluierung, Schulung und modellbasierte Prozesskontrolle von KA eingesetzt werden (Hauduc et al. 2009, Phillips et al. 2009, Rivas et al. 2008, Langergraber et al. 2004, Copp et al. 2003, Hao et al. 2001). Diese Modelle ersetzen die Bemessungsrichtlinien nicht, sondern dienen derer Unterstützung durch Verbesserung bzw. Ergänzung der Ergebnisse. Im deutschsprachigen Raum werden die ASM für die Szenarienanalyse von bereits vorhandenen Anlagen verwendet. Bei dieser Art der Anwendung wird die Anlage im Modell abgebildet und kalibriert. Auf diese Weise können Veränderungen und deren Effekte auf die biologische Abbaubarkeit betrachtet und analysiert werden. Unter Verwendung eines Standardparametersatzes können die dynamischen Modelle ebenfalls zur Konzeptionierung von neuen Anlagen verwendet werden (Alex et al. 2007, Corominas et al. 2010, Henze et al. 2000). Das ASM1 wurde 1986 entwickelt und ermöglicht die dynamische Simulation der aktiven Bakterienpopulation und der organischen Substrate (Zucker, Aminosäuren, flüchtige Fettsäuren, Kohlenhydrate, Proteine, etc.) sowie deren Abbau und der Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse. Der CSB wird fraktioniert betrachtet und der Stickstoff in Form von Ammoniak und Nitrat charakterisiert. Aufgrund der hohen Sensitivität der anaeroben Bakterienpopulation in Bezug auf den pH-Wert, wird dieser über die Pufferkapazität des Abwassers über das Säure-Base-Gleichgewicht im Modell dynamisch ermittelt (Grau et al. 2009, Gujer 2006, Gernaey et al. 2004, Henze et al. 2000, Gujer et al. 1999). Zur Integration und Beschreibung der biologischen und chemischen Phosphorelimination wurde 1995 das ASM2

veröffentlicht. In der komplexeren Weiterentwicklung, welche mehr Stoffbestandteile betrachtet, ist das organische Material des CSB in fermentierbare, fermentierte und langsam biologisch abbaubare Bestandteile unterteilt worden. Zudem gilt als wichtigster Aspekt die Integration der Kontinuitäts-gleichung zur Elementmassen- und Ladungskontinuitätsbewertung der Transformationen (van Loosdrecht et al. 2015, Grau et al. 2009, Gernaey et al. 2004, Henze et al. 2000). Das ASM2d wurde 1999 als geringfügige Erweiterung des ASM2 herausgebracht. In diesem Modell findet die Beschreibung des denitrifizierenden Prozesses von Phosphor akkumulierenden Organismen (PAO) durch die Verwendung zellinterner Speicherprodukte statt. Zuvor erfolgte im ASM2 die Betrachtung unter der Annahme, dass PAOs sich ausschließlich unter aeroben Bedingungen entwickeln (van Loosdrecht et al. 2015, Henze et al. 2000, Gernaey et al. 2004, Grau et al. 2009). Mit dem ASM3 (Gujer et al. 1999) erfolgte 1999 eine Überarbeitung des ASM1 hinsichtlich festgestellter Einschränkungen im Modell. Diesbezüglich wurden die Prozesse der Substratspeicherung und der endogenen Atmung durch die Bakterienpopulationen detaillierter beschrieben. Für die Ermittlung des theoretischen Sauerstoffbedarfs (ThOD), des Stickstoffs und der Ladungskontinuität wurde im ASM3 ein Ansatz zur Berechnung des ThOD basierend auf den Oxidationszuständen der Stoffe integriert. Im Modell wird wie im ASM1 die Pufferkapazität des Abwassers mittels eines Parameters reduziert, welcher die Alkalität repräsentiert und den implizierten pH-Wert angibt. Im Gegensatz zum ASM1 findet im ASM3 keine Berücksichtigung des Biomassewachstums anhand von zellexternen Substraten statt (Henze et al. 2000, Gernaey et al. 2004, Grau et al. 2009, Gujer et al. 1999). Im ASM3 ist auch keine Phosphorelimination integriert, allerdings kann dieses Modell um die Beschreibung der Bio-P-Prozesse in Form des EWAG Moduls von Rieger et al. (2001) erweitert werden, welches modifizierte Prozesse aus dem ASM2d enthält (ohne die Betrachtung der Fermentation leichtabbaubarer Substrate). Neben der hohen Komplexität der ASM und den damit verbundenen benötigten Prozesskenntnissen bedarf es für die Kalibrierung zahlreicher Daten über die betrachteten Parameter (Sin et al. 2005, Gernaey et al. 2004, Vanrolleghem et al. 1999). Neben den ASM gibt es weitere mathematische Modelle zur Beschreibung der Belebtschlammprozesse, wie das ASAL Modell (Chambers und Jones 1988, Jones 1978), welches auf dem BSB<sub>5</sub>-Ansatz beruht und das TUDP Modell (van Veldhuizen 1999, Murnleitner et al. 1997), welches an der Technischen Universität von Delft entwickelt wurde.

Um sämtliche Prozesse einer KA dynamisch abbilden zu können, bedarf es Modellen zur Beschreibung von anaeroben Faulungsprozessen. Auch im Bereich der Modellierung von anaeroben Faulungsprozessen existieren unzählige mechanistische Modelle, sowohl für organische gelöste Stoffe, als auch für Tierabfälle, Gülle, Abfälle sowie für Schlämme und Abwasser (Lauwers et al. 2013). Die IWA entwickelte mit ihrem anaeroben Faulungsmodell Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) eine einheitliche Basis für die Modellierung von Faulungsprozessen (Bastone et al. 2002.). Das ADM1 ist von der Nomenklatur und Modellstruktur kompatibel mit den Belebtschlammmodellen ASM1, ASM2 und ASM3. Basierend auf dem ADM1 gibt es zahlreiche Erweiterungen und Modifikationen in Bezug auf die jeweilige Anwendung bzw. zu vergärende Produkte (Lauwers et al. 2013, Bastone et al. 2002). Das ADM1 beschreibt den anaeroben Abbau organischer Stoffe unter Berücksichtigung der aktiven Bakterienpopulationen und organischen Substrate. Hinsichtlich der hochgradigen pH- Empfindlichkeit der anaeroben Bakterien wird analog zu den ASM der pH-Wert dynamisch anhand der Pufferkapazität des Mediums und des Säure-Base-Gleichgewichts ermittelt. Im Modell werden sowohl biochemische

als auch physikochemische Prozesse betrachtet (Bastone et al. 2002). Hinsichtlich der vielen Prozessgrößen für die Beschreibung des Faulungsprozesses handelt es sich beim ADM1 um ein äußerst komplexes Modell. Eine Vielzahl der Parameter im Modell ist präzise abzugleichen, wodurch ein hoher Messaufwand entsteht. Nicht definiert ist, welche Parameter in welchen Intervallen gemessen werden sollten, um qualitativ hinreichende Ergebnisse zu erhalten (Lauwers et al. 2013, Nopens et al. 2009).

Bei den ASM und ADM ermöglicht die Vielzahl an Parametern viele Parametereinstellungen eine realitätsnahe Prozessabbildung (Alex et al. 2015). Im Zuge der Parameteranzahl ist die Kalibrierung ein kritischer Punkt in der Anwendung (Chen et al. 2015, Ruano et al. 2007, Sin und Vanrolleghem 2007, Brun et al. 2002). Vor allem die Wahl der relevanten Parameter für eine gute Abbildung ist die größte Herausforderung bei der Kalibrierung solcher Modelle (Liwarska-Bizukoje und Biernacki 2010, Hauduc et al. 2009).

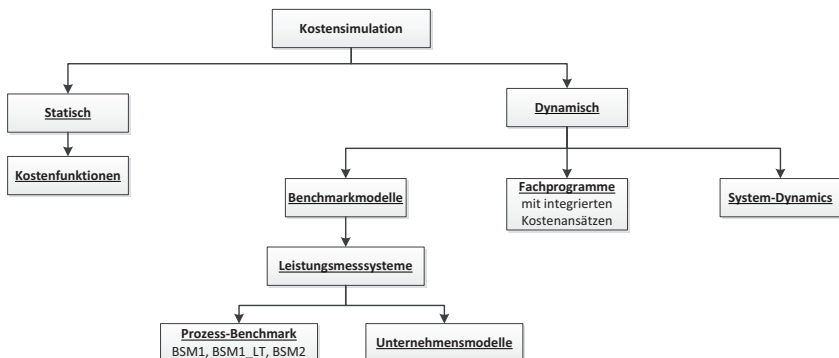
Bei den anlagenweiten Modellen existieren zwei Ansätze in der Umsetzung, der Schnittstellenansatz und das Supermodell (Gernaey et al. 2004, Nopens et al. 2009, Jones et al. 2007, Barat et al. 2013). Der Schnittstellenansatz basiert auf der Konstruktion von Transformatoren zwischen den bereits vorhandenen etablierten Standardmodellen und zusätzlichen Einzelprozessmodellen zur Abbildung einer konventionellen KA. Obwohl der Schnittstellenansatz die Konstruktion durch etablierte Modelle erleichtert, gibt es Einschränkungen bei der ordnungsgemäßen Umwandlung der Komponentenparameter, um die Massen und Ladungskontinuität unter dynamischen Bedingungen zu gewährleisten. Schnittstellen zwischen dem ASM1, ASM2d und ADM1 wurden bereits erfolgreich umgesetzt und publiziert (Grau et al. 2007, Zaher et al. 2009, Volcke et al. 2006, Vanrolleghem et al. 2005, Copp et al. 2003). Supermodelle beinhalten sämtliche KA-Komponenten in einem generalistischen Modellansatz und enthalten keine externen Modellkomponenten (Jones und Takács 2004; Seco et al. 2004). Sämtliche Komponentenparameter sind in einem Vektor enthalten, weshalb es keiner Transformatoren bedarf. Das 2004 von der CALAGUA Gruppe zur mathematischen Modellierung von biologischen Prozessen der Universität von Valencia entwickelte anlagenweite Supermodell Biological Nutrient Removal Model N°1 (BNRM1, Seco et al. 2004) enthält physikalische, chemische und biologische Prozesse einer KA. Als physikalische Prozesse sind die Flockenabsetzung, das verzögerte Absetzungsverhalten, der Eindickungsprozess, der Eluierungsprozess flüchtiger Fettsäuren und der Gas-Flüssigkeits-Transfer enthalten. Zudem werden unter Annahme der Gleichgewichtsbedingungen die Wechselwirkungen von Säure-Base-Prozessen als chemische Prozesse berücksichtigt. Als biologische Prozesse sind sowohl die Entfernung von organischem Material, Stickstoff und Phosphor als auch die für die Faulung notwendigen Prozesse integriert (Seco et al. 2004, Barat et al. 2013). Die Prozesse zur Entfernung von CSB, N und P wurden mit einigen Modifikationen dem ASM2d entnommen. Die anaeroben Faulungsprozesse basieren auf einem vereinfachten Faulungsmodell. Für die Beschreibung der Absetzungsprozesse und Herleitung der Absetzgeschwindigkeit der Partikel wurde das eindimensionale 10-Layer-Modell von Takács et al. (1991) integriert, welches auf dem Partikelströmungskonzept und Massenerhaltungsprinzip beruht und um eine Verdichtungsfunktion für die unteren Layer ergänzt wurde (Ribes et al. 2002). Mittels dieses Supermodellansatzes können Anlagenkomponenten wie VK, biologische Stufe, Nachklärung, Eindicker, Vorfermentationssysteme für den Primärschlamm und Schlammfaulung designt, simuliert und optimiert werden. Basierend auf diesem

Modell erfolgte eine Weiterentwicklung zum BNRM2. In der Weiterentwicklung fand insbesondere die Berücksichtigung der Fällung mittels acht verschiedener Fällungsprodukte statt. Mit der Ergänzung sämtlicher zur Stickstoffentfernung wichtigen Bakterienprozesse ist das Modell in der Lage, das Wachstum aller im Modell enthaltenen Bakteriengruppen in jeder Anlagenkomponente zu berücksichtigen, wobei Umgebungsbedingungen (aerob, anoxisch, anaerob) die vorhandenen Bakteriengruppen bestimmen (Barat et al. 2011, Jimenez et al. 2010). Supermodelle sind aufgrund ihrer anlagenspezifischen Anwendung in ihrer Nutzung eingeschränkt und auf andere Anlagentypen nicht übertragbar. Da die Komponenten und Parameter nur eingeschränkt ergänzt oder entfernt werden können, mindert dies die Flexibilität der Modelle (Volcke et al. 2006).

### 3.2 Methoden zur Herleitung und Prädiktion von Kosten sowie zur Betrachtung ganzheitlicher Kostenstrukturen von Aufgabenträgern

Die Kalkulation von Kosten im Bereich der Abwasserwirtschaft ist komplex, da die Kosten aufgrund unterschiedlicher spezifischer Bedingungen bei den Planungs- und Bauprozessen zwischen den Ländern und Regionen variieren (Bode und Lemmel 2001). Ansätze zur prozessbasierten Kostenermittlung und -prädiktion sind entweder detailliert, aufgaben- bzw. objektbezogen oder auf wenige Parameter abstrahiert. Diese Ansätze können übergeordnet in statische und dynamische Ermittlungsverfahren differenziert werden. Als statisches Verfahren gilt die Ermittlung der Kosten durch Kostenfunktionen. Zu den dynamischen Ermittlungsverfahren gehören die Benchmarkingmodelle, System-Dynamics und die Integration von Kostenansätzen in prozessbasierten KA- und Kanalnetz-Modellen von Fachprogrammen, die als Entscheidungsmodelle genutzt werden.

Die beschriebene Einteilung methodischer Ansätze für die Ermittlung von Kosten im Bereich der Abwasserwirtschaft ist in Abbildung 3-3 dargestellt.



**Abbildung 3-3:** Überblick methodischer Ansätze für die Ermittlung, Prädiktion und Simulation von Kosten in der Abwasserwirtschaft

### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft

---

Anhand von Kostenfunktionen sind objektbezogene Kostenbetrachtungen und -prädiktionen durchführbar. Hierfür bedarf es Funktionen für Investitions- und Betriebskosten. Als Regressionsfunktion zur Abbildung der Kosten werden bei den Investitionskosten Potenz- und Polynomialfunktionen verwendet. Dabei werden die Kosten bei KA-Verfahrenskomponenten einer Prozessgröße (Volumen, Fläche, Durchfluss) oder dem Auslegungswert in Form von Einwohnerwerten und bei Abwasserkanälen einer Baumasse (Länge, Querschnittsgröße) gegenübergestellt. Betriebskosten werden generell anhand von globalen Parametern (mittlerer Durchfluss, Einwohnerwerte) bezogen auf die KA, das Kanalnetz; die Verwaltungskosten über Potenzfunktionen abgebildet (Vanrolleghem et al. 1996, Balmér und Mattson 1994). Kostenfunktionen haben immer einen zeitlichen und örtlichen Bezug, sie werden zu einem bestimmten Zeitpunkt und für ein bestimmtes Unternehmen, eine Region oder ein Land erstellt. Der zeitliche Aspekt kann durch die inflationsbereinigte Fortschreibung der Kosten ausgeglichen werden. Anders verhält es sich mit dem örtlichen Bezug der Kosten. Bezüglich länderspezifischer als auch regionaler Preisunterschiede sowie standortspezifischen Charakteristika, beinhaltet die Übertragung von Kostenfunktionen eine gewisse Unsicherheit. Insbesondere für die Übertragung von Betriebskosten der KA, welche sich auf die durchschnittlichen Prozessleistungen beziehen, haben abweichende Anlagenkonfigurationen einen wesentlichen Einfluss auf den Grad der Unsicherheit. Aufgrund dessen ist die Verwendung von Kosten aus detaillierten Kostenbetrachtungen der von Kostenfunktionen zu bevorzugen. Kostenfunktionen dienen nur zur groben Kostenabschätzung und sind hauptsächlich für Verfahrensscreenings anwendbar (Benedetti et al. 2006a, Gillot et al. 1999).

Eine weitere Möglichkeit der Extraktion repräsentativer Kosten für die verschiedensten Aspekte in der Abwasserbranche bieten die Benchmarkinganalysen. Unter Benchmark wird ein Referenz- oder Messstandard für den Vergleich von Unternehmen oder Organisationen verstanden. Benchmarking ist ein fortlaufender Prozess zur Identifizierung der „Best Practice“ bzw. Anpassung der Verfahren bzw. Vorgänge, die zu einer überlegenen Leistung führen (Camp 1989). Benchmarkingmodelle vergleichen die Effizienz in der Gegenwart und zeigen die Steigerung der Effizienz bzw. Verbesserung der Performance über die Betrachtungszeitpunkte der Vergangenheit auf. Benchmarkingmodelle und -analysen liefern Einblicke in die Organisations-, Infra- und Kostenstruktur von Unternehmen. Besonders im öffentlichen Sektor, in welchem die Effizienz eines Aufgabenträgers nicht zu am Markt platzierten Unternehmen in Konkurrenz steht, stellt eine Leistungsbetrachtung einen Schutz für die Verbraucher dar. Benchmarking kann grob in Makro- (bzw. top-down) und Mikro- (bzw. bottom-up) Benchmarking klassifiziert werden (Marques und Monteiro 2004). Das Makro-Benchmarking besteht aus Analyseprozessen von Ergebnissen auf einem sehr hohen Aggregationsniveau zur Bestimmung der globalen Effizienz- und Produktivitätskennzahlen. Beim Mikro-Benchmarking erfolgt eine detaillierte Analyse zur Ermittlung des Verbesserungspotentials in den jeweiligen Bereichen. Dies erfolgt in einem zweistufigen Prozess. In einer ersten Phase erfolgt die Diagnose von erhobenen Kennzahlen, worauf der Entscheidungsprozess in der zweiten Phase aufbaut wird. Während die erste Klasse eher von den Aufsichtsbehörden verwendet wird, um einen Aufschluss über die Leistung des Aufgabenträgers bzw. Betreibers zu erhalten, wird die zweite Klasse von den Aufgabenträgern bzw. Betreibern selbst verwendet (Marques und Witte 2010).



### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft

---

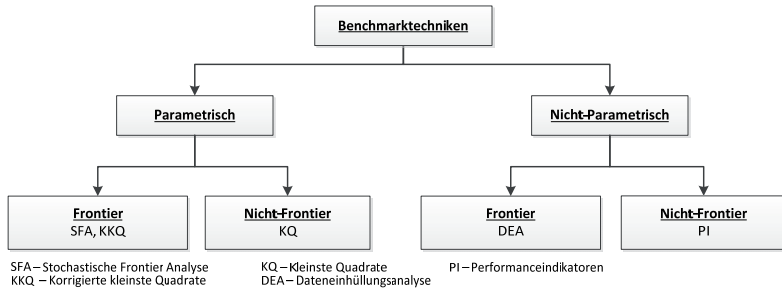
Beim Benchmarking existieren hinsichtlich des Betrachtungsgegenstandes bzw. dessen Ursprungs (worauf sich die Kennwerte beziehen bzw. wie diese erhoben wurden) nach Berg und Padowski (2010) folgende Verfahrensansätze:

- Gesamtleistungsindikatoren (engl. Core Overall Performance Indicators)
- Leistungswerte (engl. Performance Scores)
- Unternehmensmodelle (engl. Engineering/Model Company)
- Prozess-Benchmarking (engl. Process Benchmarking)
- Benchmarking anhand von Verbraucherumfragen (engl. Customer Survey Benchmarking)

Gesamtleistungsindikatoren basieren auf generell zur Verfügung stehenden Daten (Servicequalität, technische Daten, Finanzdaten) und sind der einfachste Vergleichsansatz. Anhand des Leistungs-werteansatzes können, basierend auf Produktions- oder Kostenschätzungen, quantitative Aussagen über die relative Leistung eines Unternehmens (Kosteneffizienz, technische Effizienz, Skaleneffizienz, Allokationseffizienz) getroffen werden. Die gemessene Leistung wird zum Vergleich mit anderen Aufgabenträgern herangezogen. Basierend auf der Analyse von Verfahrenstechniken und Kostenstrukturen werden anschließend Ranglisten erstellt. Auf diese Weise sind gut und schlecht performende Aufgabenträger ermittelbar. Eine weitere Form des Benchmarkings zur Erstellung einer Performance-basislinie basiert auf dem Unternehmensmodellansatz. Hierfür sind die betreffenden Unternehmen inklusive ihrer Spezifik (Topologie, Verbräuche, Bevölkerungsdichte) in einem wirtschaftlich-technischen Modell unter Berücksichtigung der Vergleichswerte im Sinne des Benchmarkings abzubilden. Anhand dieser Modelle werden Durchschnittsverbrauchswerte, technische Parameter und spezifische Kosten ermittelt. Mittels der Basislinie der Kennwerte lassen sich im Modell Optimierungen durchführen und auf das Unternehmen übertragen. Beim Prozess-Benchmarking werden die individuellen technischen Prozesse fokussiert betrachtet. Auf diese Weise lassen sich potentielle Partner für das Benchmark identifizieren, woraufhin ein Wissensaustausch im Sinne der Best Practices erfolgen kann. Zur Beurteilung der Serviceleistung und der Kundenzufriedenheit existieren auf Umfragen basierende Benchmarkinganalysen mittels derer Leistungslücken und Problemfelder ausfindig gemacht werden können. Zudem können zeitliche Trends erkannt und die Leistung von Aufsichtsbehörden und politischen Entscheidungsträgern bewertet werden (Berg und Padowski 2010).

Für das Benchmarking werden unterschiedliche analytische Methoden für die Leistungsvergleiche angewandt. Eine Einteilung dieser Methoden nach Marques und Witte (2010) ist in Abbildung 3-4 dargestellt.

### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft



**Abbildung 3-4:** Überblick analytischer Benchmarkingmethoden

Nach Marques und Witte (2010) werden die Benchmarkingmethoden in parametrische und nicht-parametrische unterteilt. Beide Ansätze lassen sich weiter in Frontier- (stochastische Grenzanalyse) und Nicht-Frontier Modelle untergliedern. Beim Nicht-Frontier Benchmarking erfolgt der Bezug bei parametrischen Ansätzen anhand der Durchschnittswerte von Daten und bei nicht-parametrischen Ansätzen anhand von Performanceindikatoren bzw. Kennwerten. Bei der nicht-parametrischen Benchmarkingmethode erfolgt die Leistungsbestimmung durch Anwendung von Performanceindikatoren (PI). Zur Beurteilung und für den Vergleich von Abwasserentsorgern stellen PI die relevanten Aspekte der Prozesse, Verfahren und Strukturen dar. Sie sind anhand einer präzisen Definition klar zu formulieren, haben so universell wie nur möglich zu sein und müssen auf einem Maß basieren, welches unabhängig von besonderen Bedingungen (z.B. Anlagengröße, Verfahrenstechnik) des jeweiligen Aufgabenträgers ist, um leicht überprüfbare Ergebnisse mittels einfacher Verarbeitung zu erhalten (Singh et al. 2014). Für große und mittlere öffentliche Aufgabenträger im Bereich der Wasserwirtschaft wurden eine Vielzahl von PI entwickelt (Sindhe et al. 2013, Office of Water Services 2012, National Water Commission 2012, Berg und Danilenko 2011, National Research Council 2010, Theuretzbacher-Fritz et al. 2005, Alegre et al. 2013, American Water Works Association 2004, Marques und Monteiro 2001). Zur Vereinheitlichung wurden von der IWA PI im Abwasserbereich zur Berücksichtigung von ökologischen, technologischen, finanziellen, personellen Ressourcen sowie zur Servicequalität festgelegt (Matos et al. 2003). Die Indikatoren lassen sich leicht ermitteln, interpretieren und decken das gesamte Abwasserentsorgungssystem ab. Jedoch beziehen sich nur wenige PI auf die KA. Zur Verbesserung des Prozessvergleichs zwischen KA wurden weitere PI entwickelt (Abbott et al. 2012, Andrews et al. 2011, Quadros et al. 2010; Quadros et al. 2009, Stahre et al. 2008). Basierend auf einer Auswahl definierter PI und zugehörigen Datenelementen, welche die realen Vorgänge von Aufgabenträgern repräsentieren, können Leistungsmesssysteme (engl. Performance Measurement Systems - PMS), die unter anderem auch als Leistungsindikatorensysteme (engl. Performance Indicator Systems - PIS) oder Leistungsbewertungssysteme (engl. Performance Assessment Systems - PAS) bekannt sind, entwickelt werden. Die PMS dienen als Managementsystem zur mehrdimensionalen Leistungsmessung (Kosteneffizienz, Nachhaltigkeit) und Unternehmenssteuerung. Aufgrund der Einfachheit und Zugänglichkeit der Daten ist das Benchmarking mit PI die am weitesten verbreitete und von den Aufgabenträgern anerkannte Methodik (Haider et al. 2016). Im

### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft

---

Gegensatz zu den anderen Benchmarkingmethoden findet hier jedoch keine Betrachtung der Beziehungen zwischen den Kenngrößen statt. Jede PI reflektiert nur eine Bezugsgröße, welche sich aus einem Eingangs- und Ausgangswert ergibt. Deshalb ist es schwierig, einen Aufschluss über die Gesamtleistung zu erhalten, wenn nicht alle PI einen ähnlichen Leistungstrend aufweisen. Hinsichtlich der Vielzahl von PI in einem PMS ist es zur Beurteilung der Leistung bei der praktischen Anwendung gängig, ein allgemeines bzw. zusammenfassendes Maß für die PI abzuleiten (Galar et al. 2014, Singh et al. 2014, Greenberg und Nunamaker 1987). Hierfür werden sogenannte Performance- bzw. Leistungsindizes kreiert, welche mehrere PI mittels eines subjektiven Gewichtungsprozesses zusammenfasst. Beim Gewichtungsprozess wird der Einfluss bzw. die Bedeutung der einzelnen PI festgelegt (Haider et al. 2016, Galar et al. 2014).

Bei Frontieranalysen wird die Effizienz des einzelnen Unternehmens anhand der eigenen Produktivität und der sich aus dem Datensatz ergebenden Produktivitätsfunktion (Frontier) der besten Unternehmen der Branche der Region bzw. des Landes gegenübergestellt und gemessen (u.a. von Hernández-Sancho et al. 2011, 2010, Molinos-Senante et al. 2016a; Molinos-Senante et al. 2011, Färe et al. 1994). Eine Erweiterung des Frontieransatzes ist der Metafrontieransatz (Molinos-Senante et al. 2017, Huang et al. 2015, Wang et al. 2013, Chen und Yang 2011, Sala-Garrido et al. 2011, Battese et al. 2004) mit dessen Hilfe sich Unternehmen aus unterschiedlichen Regionen bzw. Ländern unter Berücksichtigung substanzieller und infrastruktureller Unterschiede, wie z.B. Umgebungseinflüsse, infrastrukturelle Grundausstattung, Einsatz von und Zugang zu Technologien sowie Finanzstrukturen vergleichen lassen. Unter Annahme der Hypothese, dass alle Unternehmen in den unterschiedlichen Gruppen (Regionen, Länder, etc.) den potentiell gleichen Zugang zur selben Technologie haben, wird darauf basierend ein gemeinsames Frontier (Metafrontier) gebildet. Mittels des Metafrontier lässt sich durch das Frontier das Verhältnis der Technologielücke (engl. technology gap ratio) und der technischen Effizienz (engl. technical efficiency ratio) zwischen den Gruppen ermitteln. Mit dieser Methodik erhält ein Unternehmen Aufschluss über seinen technologischen Stand und seine Effizienz im regionalen bzw. landesweiten Vergleich zu anderen Unternehmen seiner Branche unter Berücksichtigung gegenwärtig dort verfügbarer Technologien sowie einen übergreifenden Vergleich zur gesamten Branche und den weltweit angewandten Technologien (Battese und Rao 2002). Parametrische Frontieranalysen beruhen auf Regressionsanalysen oder stochastische Frontieranalyse Methoden (Cobb-Douglas-Funktion) unter Nutzung umfangreicher Daten von zahlreichen Unternehmen aus der Branche. Nicht-parametrische Frontieranalysen basieren auf der deskriptiven Methodik der Dateneinhüllanalyse (engl. Data Envelopment Analysis - DEA) nach Charnes et al. (1978) für konstante Skalenerträge und nach Banker et al. (1984) für variable Skalenerträge, welche zur Messung der relativen Effizienz bestimmter Untersuchungsobjekte sogenannter Entscheidungseinheiten (engl. Decision Making Units - DMU) dient. Eine DMU kann jedes Untersuchungsobjekt sein, welches durch Eingangs- (z.B. Kosten, Arbeitsaufwand in Stunden) und Ausgangswerte (z.B. Umsatz, Qualitätsniveau) charakterisiert werden kann. Für jede DMU wird ein Effizienzwert berechnet, welcher den Abstand zur jeweiligen, aus den Gesamtdaten abgeleiteten Frontier wiedergibt. Diese Funktion aus den besten Untersuchungsobjekten umhüllt die effizienten Objekte, weshalb diese Funktion als Umhüllende, Effizienzhülle oder auch Effizienzrand bezeichnet wird. Mittels des berechneten

### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft

---

Effizienzwertes lassen sich unmittelbar Verbesserungspotentiale ableiten und individuelle Benchmarking-Partner identifizieren, wodurch Transparenz im Prozess zur Effizienzsteigerung geschaffen wird. Das ursprüngliche Einsatzfeld der DEA ist der „Non-Profit“ Sektor, da nicht-monetäre Faktoren wie Qualitätskomponenten einbezogen werden können. In Abhängigkeit von der Berechnungsweise der Effizienz einer DMU wird zwischen radialen und nicht-radialen Modellen unterschieden (Tone und Tsutsui 2010; Tone 2001). Radiale DEA (u.a. von Molinos-Senante et al. 2016b; Molinos-Senante et al. 2015, Mahmoudi et al. 2012, Carvalho und Marques 2011, Hernández-Sancho und Sala-Garrido 2009) ermitteln die Effizienz durch die lineare Projektion des Effizienzrandes zur DMU. Dabei werden die Bedeutungsgewichte der Inputs und Outputs vom Modell selbst bestimmt, wobei die Effizienz der DMU maximiert wird. Bei den nicht-radialen DEA (u.a. von Wang et al. 2016, Chen und Yang 2011, Hernández-Sancho et al. 2011, Zhong et al. 2011, Zhou et al. 2007, Färe et al. 1994) findet eine Effizienzbewertung aller Inputs und Outputs individuell statt, wodurch eine detaillierte Betrachtung des Verhaltens und der Wirkungsweise zwischen den Eingangswerten und Ausgangswerten ermöglicht wird (Hernández-Sancho et al. 2011, Cooper et al. 2001). Eine Weiterentwicklung der DEA ist die DEA Fensteranalyse (engl. Window Analysis) zur Betrachtung der Effizienzentwicklung von DMUs. Hierfür wird die Effizienz der DMUs über mehrere Perioden miteinander verglichen (Wang et al. 2018, Lorenzo-Toja et al. 2018).

Zur Optimierung von KA-Kontrollprozessen unter standardisierten Evaluationskriterien, zum Konzeptvergleich und zur Optimierung von Steuerungs- und Regelungssystemen wurden basierend auf den ASM und ADM prozessbasierte dynamische Benchmarkmodelle (BSM: Benchmark Simulation Model) entwickelt. Die Entwicklung von Benchmarkinganwendungen für Belebtschlammverfahren erfolgten zunächst unter der Arbeitsgruppe der europäischen Kooperation im Bereich der Wissenschaft und technischen Forschung (European Cooperation in the field Scientific and Technical Research-COST) und wurden anschließend unter dem Schirm der IWA fortgeführt. Das von der IWA entwickelte BSM1 (Alex et al. 2008, Copp et al. 2008, Copp 2002) ist eine Plattform mit einem definierten Anlagenlayout, Bioprozess-, Sensoren- und Aktuatoren-Modell. Zudem enthält das Modell Ansätze zur Ermittlung des Energieverbrauchs für die Belüftungs- und Pumpenanlagen und integrierte Indizes für die Ermittlung der Performance und Betriebskosten. Der Betriebskostenindex bildet nicht die realen Kosten ab, sondern bildet einen Indexwert in Relation zu den gewichteten Betrachtungsgrößen in diesem Index für einen relativen Vergleich der Effizienz von Veränderungen in der Steuerung bzw. Regelung von Verfahrenstechniken. Der Betriebskostenindex berechnet sich aus einer Gewichtung der Kosten für die Belüftung, Pumpen, Rührer, externe Kohlenstoffquellen (Ethanol) und der Schlammproduktion (Flores-Alsina et al. 2009). Generell handelt es sich um ein simples Modell eines hochbelasteten Belebungsverfahrens mit vorgeschalteter Denitrifikation und anschließender Nachklärung. Als Grundlage zur Abbildung der KA dient das ASM1 mit einer Erweiterung eines integrierten Nachklärmodells. Im Fokus der Analysen des BSM1 stehen dabei die gezielte Beeinflussung der Stickstoffelimination und Sauerstoffregelung. Das BSM1 wurde zur Betrachtung von saisonalen Veränderungen zum Langzeit Benchmark Simulationsmodell (BSM1\_LT) weiterentwickelt (Rosen et al. 2004). Zur Berücksichtigung der Schlammbehandlung im BSM wurde basierend auf dem ASM2 das anlagenweite BSM2 konzipiert und durch die Ergänzung um Anlagenkomponenten wie VK, Eindicker, Entwässerung und Faulbehälter erweitert. Ebenfalls wurde der Betriebskostenindex

### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft

---

angepasst. Zum einen erfolgte eine Erweiterung um die Kosten für die Heizenergie zur Erwärmung des Schlammes in der Faulung und um die Kosteneinsparung durch die Methanproduktion. Für die Ermittlung der Betriebskosten der Pumpen fand eine erhebliche Anpassung statt. Der Energieverbrauch wird unter Berücksichtigung verschiedener Pumpenarten und Durchflussmengen ermittelt. Des Weiteren erfolgte eine Neugewichtung der einzelnen Kostenbestandteile im Index (Gernaey 2014, Nopens et al. 2010, Jeppsson et al. 2007). Hinsichtlich höherer Rechenleistungen sind mit dem BSM2 Evaluierungsperioden von 5 bis 10 Jahren mit allen detaillierten Parametern und Performanceanalysen möglich. Für längere Simulationszeiträume sind Teile des Simulationsmodells hinsichtlich der Rechengeschwindigkeit in Form von Simplifikationen zu optimieren (Ráduly et al. 2007). Die Nichtberücksichtigung von Kapital-, Instandhaltungs- und Personalkosten in den BSM wird, hinsichtlich deren Relevanz für den Entscheidungsprozess, in der Literatur kritisiert. Denn die Effizienz eines Verfahrens ist nicht ausschließlich von dessen Prozessleistung abhängig. Dies gilt ebenso für die Effizienzbetrachtung der operativen Kontrollstrategien, denn die Kapitalkosten der Implementierung sollten den erzielbaren Nutzen durch die Regelungseinheit nicht übersteigen. Diesbezüglich bedarf es bei den BSM der Integration eines Kapital-, Instandhaltungs- und Wartungskostenindex für die Effizienzbetrachtung (Jeppsson et al. 2013, Corominas et al. 2010, Gillot et al. 1999).

Als Entscheidungsprozesswerkzeug für die Verfahrenswahl und Dimensionierung von Abwasseranlagen integrierten Benedetti et al. (2006a, 2006b) Kostenfunktionen zur Identifizierung der ökonomischen und ökologischen Konsequenzen in die ASM der IWA. Bezüglich der ökologischen Betrachtung werden neben Parametern zur Evaluierung der Wasserqualität auch sekundäre Einträge und Verbräuche, wie Chemikalien und Energie mitberücksichtigt. Die Ermittlung der Betriebskosten erfolgte mittels der Benchmark-Bewertungsprozedur nach Copp (2002) und anhand von repräsentativen Preisen für Nordeuropa. Die Kapitalkosten wurden vom Ruhrverband übertragen. Im Modell findet eine Betrachtung folgender Kostenarten statt: Energiekosten für die Belüftung, Pumpen, Rührer, Schlammbehandlungs- und Schlammmentsorgungskosten. Zusätzlich werden die Personalkosten, Instandhaltungs-, Kapital- und Gesamtkosten betrachtet.

Ein pragmatischer ganzheitlicher Ansatz zur kombinierten Bewertung von möglichen Veränderungen der rechtlichen, technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen von Abwasserentsorgungsunternehmen wurde von der DWA-Arbeitsgruppe WI-1.3 „Wirtschaftliche Auswirkungen struktureller Veränderungen“ entwickelt. Dieser Ansatz basiert auf einer vereinfachten Simulationsmethodik, welche die Kennzahlenwerte des Unternehmensbenchmarking verwendet. Aus den arithmetischen Mittelwerten der technischen, kaufmännischen und leistungsbezogenen Kennzahlenwerte wurde ein definiertes fiktives Standardunternehmen der Branche abgeleitet. Mittels dieser Methodik können ausgewählte Trends für die wirtschaftlichen Auswirkungen und ihre Überlagerung abgeleitet werden. Im Modell werden die Kostenstellen der Abwasserableitung, Abwasserbehandlung und der unterstützenden Prozesse abgebildet. In jeder Kostenstelle wird zwischen Abschreibung, Zinsen und kostenstellenspezifischen Betriebskostenarten unterschieden. Die Betriebskosten werden aus der Teilprozessbetrachtung anhand der jeweiligen Kosten- und Erlösarten ermittelt. Die Berechnung der Kapitalkosten erfolgt durch die Fortführung der Zinsen und Abschreibungen aus der Kostenstruktur der Eingangsdaten mittels vereinfachter AfA- und Zinskalkulation unter Berücksichtigung der entsprechenden Abschreibungsdauern. Das Modell ist ein ökonomisches Bewertungsinstrument, welches

### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft

---

ein Abwasserentsorgungsunternehmen konzeptionell als Ganzes betrachtet. Komplexe Wechselwirkungen oder Änderungen in den Organisationsstrukturen oder weitreichende Änderungen der technischen Systeme bzw. Anlagen können jedoch nicht angemessen berücksichtigt werden (Tränckner et al. 2014; Tränckner et al. 2013).

Die Systemdynamik (engl. System Dynamics - SD) ist eine Methodik zur ganzheitlichen Analyse und Modellierung komplexer Systeme (Forrester 1958). Anwendung findet diese Methodik vor allem in der Sozioökonomie sowie in den Sozial- und Naturwissenschaften (Ford 1999; Forrester 1969; Sterman 2000). Durch die Simulation und Erklärung des komplexen Verhaltens von Menschen in sozialen Systemen sind Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Akteuren abbildbar. Im Bereich der Betriebswirtschaft und Volkswirtschaft wird die SD für Produktionsmanagement, strategische Planung, Analyse und Design von Geschäftsmodellen, Geschäftsprognosen und Szenarioanalysen angewendet. Auch im Bauingenieurwesen wird die SD für Wasserressourcen-, Bau-, Autobahn-, Verkehrsmanagement sowie für Abfallwirtschaft und Gebäudedesign genutzt (Rehan et al. 2014a). Basierend auf dieser Methodik lassen sich geschlossene Wirkungsketten (engl. feedback loops) identifizieren und qualitativ untersuchen. Eine Wirkungskette hat kausale Beziehungen zwischen den Systemkomponenten. Ändert sich eine Komponente, wird die Störung entlang der Schleife übertragen und führt zu einer Änderung der Ursprungs-komponente. Erfolgt bei einer Änderung der Ursprungs-komponente eine Änderung in anderen Komponenten, welche den ursprünglichen Prozess verstärken, so wird die daraus resultierende Rückkopplung als positive bzw. selbstverstärkende Schleife (engl. reinforcing loop) bezeichnet. Wirkt stattdessen die Reaktion anderer Komponenten der ursprünglichen Reaktion entgegen, wird von einer negativen bzw. ausgleichenden Schleife (engl. balancing loops) gesprochen. In der SD Modellierung wird zwischen qualitativen und quantitativen Modellen unterschieden. Die qualitative Analyse dient der Abwägung der Annahmen und Modellgrenzen des Systems sowie als Grundlage für dessen anschließende quantitative Modellierung (Sterman 2000, Hannon et al. 2001). Für die Beschreibung der Systemzusammenhänge und des Verhaltens der Wirkungsketten dienen sogenannte Grundbausteine der SD. Zu diesen gehören Lager bzw. Bestände (engl. Stocks), Abläufe bzw. Ströme (engl. Flows) und Hilfsgrößen, wie Konverter und Konnektoren. Lager können physisch (z.B. Sachgegenstände, Betriebsstoffe, etc.) als auch nicht physische Werte (z.B. Kundenzufriedenheit) sein. In einem Lager existieren die Werte bis zu einem bestimmten Zeitpunkt und bleiben auch nach den Aktivitäten bzw. Bewegungen an sich bestehen. Abläufe bzw. Ströme stellen Aktivitäten oder Maßnahmen in einem Lager dar, welche sofort oder über einen definierten Zeitraum zu Zu- oder Abflüssen führen (Rehan et al. 2011). In der Wasserwirtschaft wurde die SD von Guest et al. (2010) zur qualitativen Analyse von Wechselwirkungen zwischen Nachhaltigkeitsaspekten von dezentralen Abwasserbehandlungsanlagen genutzt. Ahmad und Prashar (2010) untersuchten mittels eines SD-Modells die Zusammenhänge zwischen Bevölkerungswachstum, Landnutzungsänderungen, Wasserbedarf und Wasserverfügbarkeit. Ein sektorenübergreifendes SD-Modell eines kommunalen Wasserversorgungssystems zur Betrachtung der Zusammenhänge zwischen den Sektoren Finanzen, Produktion, Vertrieb als auch Betrieb und Wartung (ohne physische Infrastruktur) wurde von Adeniran und Bamiro (2010) erarbeitet. Auf der Grundlage des qualitativen SD-Modells für ein kommunales Wasser- und Abwasser-Assetmanagement von Rehan et al. (2011) wurden Instrumente zur Entscheidungsunterstützung für das Management von Wasserversorgungsinfrastrukturen (Rehan et al.

2015; Rehan et al. 2013) und Abwasserentwässerungssystemen (Rehan et al. 2014a; Rehan et al. 2014b) entwickelt. Diese SD-Modelle dienen zur quantitativen Wirkungsanalyse von komplexen Wechselwirkungen und Rückkopplungsschleifen zwischen physischen Infrastrukturen, finanziellen sowie sozialen Sektoren und ermöglichen somit, die Auswirkungen alternativer Finanzierungs- und Sanierungsstrategien auf die Systemleistung zu testen. Die Prozesse, die auf die physische Infrastruktur der Netze wirken, werden durch Alterungsmodelle abgebildet. Die Abwasserbehandlung wird in dem Modell von Rehan et al. (2014a) nicht physisch dargestellt, stattdessen findet im Finanzbereich eine indirekte Berücksichtigung der Aufwendungen statt. Der Bereich der Finanzen in diesem Modell beinhaltet vier Schlüsselvariablen: Abwassergebühr, Gewinn- und Verlustrechnung (GuV), Verfügbarkeit liquider Mittel und Verschuldung. Jeder dieser Variablen sind Bestandsstrukturen zugeordnet, diese sind wiederum mit anderen Variablen verbunden. Im Verbraucherbereich des Modells werden die Wechselwirkungen zwischen Abwasseranfall, der vom Wasserverbrauch abhängt, und den Abwassergebühren abgebildet. Gebührenerhöhungen können zu einer preisinduzierten Reduzierung des Wasserverbrauchs und somit auch zur Reduzierung des Abwasseranfalls führen. Für die Darstellung dieser Wechselwirkungen werden im Modell folgende Komponenten berücksichtigt: aktueller Wasserbedarf, Preiselastizität der Wassernachfrage, Mindestwasserbedarf, Abwassergebühr, Anpassungszeitraum der Nachfrage (in Abhängigkeit von kurzfristigen oder langfristigen Effekten), aktuelle Bevölkerungszahl und Bevölkerungswachstumsrate. Zusätzlich wurden in dem Modell politische Hebel zur Formulierung diverser Finanzierungs- und Instandhaltungsstrategien integriert. Als politische Hebel wurden von Rehan et al. (2014a) die zulässige Gebührenerhöhungsrate, Sanierungsrate, Kanalnetzanteile innerhalb einer bestimmten Zustandsklasse, Ausschlussfristen von Kanalnetzanteilen und die Verschuldungskapazität integriert. Ganjidoost et al. (2015) kombinierte die quantitativen Modelle für die Wasserversorgungsinfrastrukturen und Abwasserentwässerungssysteme von Rehan et al. (2014a, 2013). Durch die Kombination beider Modelle ist eine gesamtheitliche Betrachtung der sich gegenseitig beeinflussenden Wirkungsketten beider Sektoren durchführbar. Gegenwärtig existieren ausschließlich SD-Modelle mit der physischen Integration der Wasserver- und Abwasserentsorgungsnetze ohne Integration von Behandlungsanlagen, Pumpstationen sowie weiteren notwendigen Assets. Allgemein handelt es sich um reine Asset-Management-Modelle mit integriertem Life-Cycle-Assessment (LCA). Prozessbasierte Wirkungsketten zur Beschreibung der Aufwände für die Abwasserbehandlung wurden bislang nicht integriert, da diese keine Bewandnis für ein Asset-Management haben. Der Vorteil bei den genannten SD-Modellen liegt in der detaillierten Abbildung von Finanzprozessen und in der sektoralen Betrachtung.

### **3.3 Bedarf eines ganzheitlichen Ansatzes zur wirtschaftlich - technischen Analyse von Aufgabenträgern der Abwasserwirtschaft**

Zur prozessbasierten Abbildung von KA und Abwasserentsorgungsnetzen existieren zahlreiche Modelle mit unterschiedlichen Ansätzen. Dabei sind die dynamischen Modellansätze größtenteils sehr komplex und weisen, bezogen auf die Parameteranzahl, einen hohen Datenbeschaffungsaufwand auf. Es existieren im Bereich der Kanalnetzsimulation Modelle zur hydraulischen Berechnung, zur Beschreibung von Sedimentations- und biochemischen Umbauprozessen der im Abwasser enthaltenen Stofffraktionen und Substanzen (Stofffrachtmodelle) neben Kanalalterungsmodellen zur Prognose von Kanalzustandsveränderungen. Letztere dienen dem Asset-Management zur Entwicklung von Instandhaltungsstrategien. Auf Grundlage dieser Strategien ist eine Betrachtung der sachenlagenwertbedingten Kostenentwicklung von Abwasserentsorgungsnetzen durchführbar. Die in Kap. 3.1.1 genannten Kanalalterungsmodelle sind in kommerziellen Kanalnetzprogrammen integriert. Zu den verbreitetsten Programmen als Entscheidungsinstrumente für die Kanalnetzbewirtschaftung gehören AQUA WertMin und DynaStrat, die auf den Kohortenüberlebensfunktionen basieren sowie GompitZ, Kanew-Z und STATUS, die auf den Markov-Kettenmodellen beruhen. Bei der KA-Modellierung steht die Prozessabbildung für die Optimierung der Anlagen und des Prozessverständnisses im Mittelpunkt. Zu den kommerziellen Softwareprodukten für KA-Simulationen gehören BioWin<sup>TM</sup>, AQUASIM, JASS, SciLab, EFOR<sup>TM</sup> und LabVIEW. Diese Programme gehören zu den geschlossenen Simulatoren, die auf einer eigenen Nutzeroberfläche basieren und in denen keine Berechnungsansätze manuell geändert oder ergänzt werden können. Im Gegensatz zu den geschlossenen gibt es auch die sogenannten offenen Simulatoren, wie GPSX<sup>TM</sup>, SIMBA<sup>®</sup> und WEST<sup>®</sup>, in welchen sich mittels Programmiersprachen (Fortran oder C++) Berechnungsansätze manuell ändern bzw. erweitern lassen. Durch die Erweiterbarkeit wurden von Gillot et al. (1999) und Benedetti et al. (2008) in WEST<sup>®</sup> Kostenbetrachtungen durchgeführt. In allen Softwareprodukten ist die KA der Betrachtungsschwerpunkt, in SIMBA<sup>®</sup> sind zudem das Kanalnetz und das Fließgewässer aus stofflicher Sicht abbildbar. Modelle für die Zustandsbewertung von KA bzw. deren Komponenten stehen derzeit nicht zur Verfügung, weshalb Instandhaltungsstrategien für KA gegenwärtig nicht integrierbar sind. Infolgedessen lassen sich Reparaturkosten von KA nicht abschätzen. Ausschließlich die Reinvestitionskosten lassen sich über Abschreibungszeiträume ermitteln.

Mit den genannten fachspezifischen Programmen der Abwasserwirtschaft lässt sich keine schnittstellenlose, zusammenhängende, unternehmensweite Abbildung der gesamten Infrastruktur im Aufgabengebiet realisieren. Für jede KA des Aufgabenträgers ist für alle aufgezählten Programme ein separates Modell zu konzipieren. Zudem wären bei dem Detaillierungsgrad der Modellierung bei mehreren komplexen KA große Rechenkapazitäten notwendig. Kanalnetzprogramme sind für die Konzeption von großen Abwasserentsorgungsnetzen ausgelegt. Durch die Integration von hydraulischen Berechnungen können sich in Abhängigkeit vom Berechnungsansatz und der Modellkomplexität bei großen Netzen längere Rechenzeiten ergeben. Für eine unternehmensweite Betrachtung wären Schnittstellen zwischen den einzelnen Modellen und Programmen zur Informationsweitergabe notwendig. Durch die fragmentierte Modellierung von Abwasserentsorgungsnetzen und KA sind standortübergreifende Konzeptmaßnahmen nur schwer integrierbar und zeitaufwendig. Konzeptmaßnahmen können mittels dieser Programme nicht durch einen Algorithmus anhand



### 3. Überblick über den Stand der Modellierung von Prozessen und Kosten in der Abwasserwirtschaft

---

von logischen zuvor festgelegten Konzeptbedingungen und anschließenden dynamischen Konzeptvergleichen bzw. Nutzwertanalysen hergeleitet werden. Des Weiteren sind Berechnungen von Szenarien auf diese Weise sehr aufwendig, da diese für jedes Modell separat zu erfolgen haben. Random-Parameteranalysen mittels MCS für Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen sind bei fragmentierten Modellen nicht durchführbar. Unternehmensweite Gesamtbetrachtungen erfolgen gegenwärtig ausschließlich durch Benchmarkinganalysen, unter anderem durch DEA oder durch PI. Dabei handelt es sich um zugeschnittene Modelle zum Zweck der ökonomischen und ökologischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Es findet keine prozessbasierte Herleitung von technischen Parametern in diesen Modellen statt, stattdessen werden Kennwerte verwendet. Mit diesen Modellen lassen sich Simulationen von Szenarien und Prognosen mit integriertem MCS für Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen umsetzen. Durch die fehlende physische Abbildung der Infra- und Organisationsstruktur ist die Überprüfbarkeit von Maßnahmenkonzepten nicht gegeben.

Die Recherche über die zur Verfügung stehenden Modelle und Softwarepakete zeigt einen Bedarf an methodischen Ansätzen zur ganzheitlichen wirtschaftlich-technischen Betrachtung von Aufgabenträgern der Abwasserwirtschaft auf. Ein ganzheitlicher Ansatz kann als Instrument zur strategischen Ausrichtung auf die zukünftigen Anforderungen sowie zur Maßnahmenanalyse dienen. Hierfür bedarf es der Abbildung der Infra- und der Kostenstruktur des Aufgabenträgers. Der Detaillierungsgrad eines solchen Ansatzes wird durch die Betrachtungsebene, den Betrachtungsschwerpunkt und durch die zur Verfügung stehenden Daten determiniert. Auf der Betrachtungsebene eines Aufgabenträgerentsorgungsgebietes sind die Prozessabläufe in den KA-Komponenten und im Abwasserentsorgungssystem so abzubilden, dass eine ökonomische und ökologische Betrachtung von relevanten Kostentreibern und Parametern möglich ist. Hierfür bedarf es eines prozessbasierten Ansatzes mit integriertem Asset-Assessment. Im Hinblick auf den Detaillierungsgrad ließen sich mit einem ganzheitlichen Ansatz aus ökonomischer Sicht strategische Unternehmensplanungen und Bewirtschaftungsstrategien durchführen. Aus technischer und ökologischer Sicht wären bezogen auf den Detaillierungsgrad grobe Konzeptplanungen bzw. -vergleiche und Machbarkeitsuntersuchungen durchführbar.

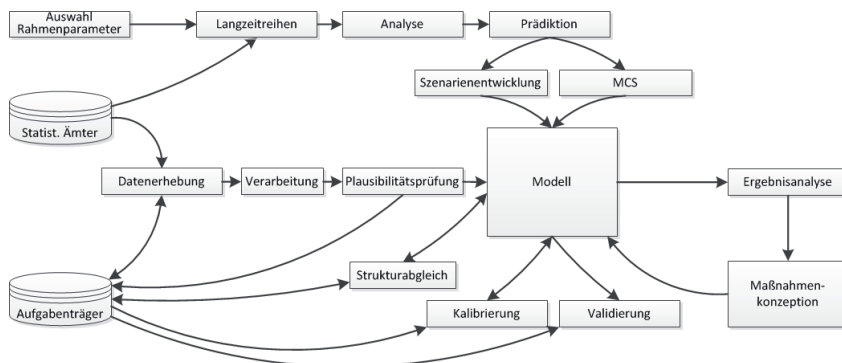
### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

#### 4.1 Vorgehensweise

Als Datengrundlage für das Modell wurden zur Abbildung der Infrastruktur und des Entsorgungsgebietes von Aufgabenträgern gebietsspezifische Daten auf Gemeindeebene und objektbezogene Daten von KA erhoben. Die Gemeindedaten wurden durch Abgleich der Entsorgungsgebietsgrenzen mittels des amtlichen Gemeindeschlüssels (AGS) auf Aufgabenträgerebene aggregiert. Über den AGS konnten die Objektdaten der KA den Aufgabenträgern zugeordnet werden. Die Gesamtheit der erhobenen gebietsspezifischen und wirtschaftlichen Daten bilden den Modelleingangsparametersatz. In Zusammenarbeit mit einem Aufgabenträger wurde zur Abbildung dessen Struktur der entsprechende Datensatz aus den Datenbanken extrahiert, auf Plausibilität geprüft und bei Abweichungen die Werte korrigiert. Zur Abbildung der Finanz- und Organisationsstruktur (Personal für Verwaltung, Behandlungsanlagen und Kanalnetz) sowie für weitere technische Informationen bezüglich des Kanalnetzes als auch der KA fand eine Erhebung über ein Abfrageformular beim Aufgabenträger statt (siehe Anhang 1). Des Weiteren erfolgte ein Abgleich der Kostenstruktur des Aufgabenträgers über die Zuordnung von einzelnen Kostenpositionen zu den jeweiligen Kostenarten. Bezüglich des Untersuchungsschwerpunktes von Auswirkungen einer Bevölkerungsreduktion wurden fünf Rahmenparameter ausgewählt, welche einen prägnanten Einfluss auf die wirtschaftliche und technische Entwicklung der Aufgabenträger haben und somit den zukünftigen finanziellen als auch strukturellen Gestaltungs- und Handlungsrahmen definieren. Für die Kalibrierung und Validierung des Modells bedarf es zusätzlicher technischer als auch wirtschaftlicher Daten, welche vom betrachteten Aufgabenträger zur Verfügung gestellt wurden. Bei der Kalibrierung werden durch Parameteranpassungen die Abweichungen zwischen simulierten und realen Werten minimiert und bei der Validierung die bestehenden Abweichungen bzw. Modellgüte ermittelt. Nach erfolgter Modellanpassung und Bestimmung der Modellgenauigkeit erfolgte die Modellnutzung. Um aussagekräftige Prognoseergebnisse, die mit einer hohen Wahrscheinlichkeit die zukünftigen Gegebenheiten repräsentieren, zu erhalten hat die Festlegung der Rahmenparameterwerte einen großen Stellenwert. In Anbetracht dessen wurde eine Analyse von historischen Langzeitreihen dieser Parameter vollzogen. Zum einen wurde anhand der Zeitreihenwerte eine Häufigkeitsverteilung erstellt und geprüft ob eine Normalverteilung vorliegt. Danach wurden die Zeitreihen auf Trends überprüft, die Bandbreite der Zeitreihenwerte der vergangenen Jahre sowie statistische Kenngrößen ermittelt. Basierend auf der Langzeitreihenanalyse erfolgte eine Prädiktion der Rahmenparameterentwicklung bis zum Prognosehorizont. Basierend auf dieser Prognose erfolgte die Konzeption der Szenarien als auch die Festlegung der Rahmenparameterbandbreite für die MCS. Die aus der Simulation hervorgehenden Prognoseergebnisse wurden ausgewertet und interpretiert. Anhand der Anpassungsvorschläge aus den Leitbildprozessen und der Literatur (siehe Kap. 2) wurden nach Rücksprache mit dem betrachteten Aufgabenträger drei Maßnahmen ausgewählt und in das Modell durch Konzeption von Modulen integriert. Für eine detaillierte Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Effekte dieser Maßnahmen erfolgte eine Ergebnisanalyse unter den definierten Rahmenbedingungen der Szenarien. Anschließend wurden die Maßnahmeneffekte mit den Prognoseergebnissen aus den Szenarien verglichen und bewertet.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

In Abbildung 4-1 ist die Vorgehensweise der Entwicklung des Modells, der Szenarien- und MCS sowie der Anpassungsmaßnahmen schematisch abgebildet.



**Abbildung 4-1:** Vorgehensweise bei der Modellentwicklung

#### 4.2 Datenerhebung und Datenverfügbarkeit

Zur Abbildung der infrastrukturellen, betrieblichen und administrativen Strukturen eines Aufgabenträgers wird ein umfangreicher Bestand an Daten benötigt. Hinsichtlich der Vertraulichkeit der Daten und des großen Zeitaufwandes für die Erhebung wurde, für diese Untersuchung auf zuvor bei den Landesämtern erhobenen Daten, einer vorhergehenden Studie von Gießler und Tränckner (2014) bezüglich der Herausforderungen für die Aufgabenträger in M-V aus demografischer und infrastruktureller Sicht, zugegriffen. Der den exemplarischen Aufgabenträger betreffende Datensatz aus dem Datenbestand wurde in Zusammenarbeit mit dem Aufgabenträger auf Richtigkeit und Plausibilität überprüft.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Ein Überblick über die gesammelten Daten und deren Herkunft ist in Tabelle 4-1 zu finden.

**Tabelle 4-1:** Erhobene Datensätze als Eingangsparameter und Modellgrundlage

Themenbereich der Daten	Quelle	Art der Erhebung	Datensatz
Kanalnetz (Länge, Alter)	Statistisches Landesamt M-V (StatA MV)	Bundesstatistik	Strukturdaten Leitungen
Anschlussgrad		Mikrozensus	Strukturdaten Gemeinden
Art der Abwasserentsorgung			
Abwasseraufkommen (Art, Menge)			
Bevölkerung (Anzahl, Alter)			
Flächennutzung	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie M-V (LUNG)	Erhebung des LUNG basierend auf dem Abwasserabgabengesetz (AbwAG)	Objektdaten KA
Siedlungsstruktur (Anz. Wohnungen)			
Ausbaugröße			
Verfahrenstechnik			
Baujahr und Kapazität			
Nominale Auslastung	Aufgabenträger	Eigenerhebung	Ökonomische Daten
Zu- und Ablaufwerte			
Erlaubniswerte			
Zusätzl. Verfahrensstufen			
Schlammbehandlung/-entsorgung			
Co-Substrate			
Energieverbrauch/-erzeugung			
Gebühren			
Jahresberichte (GuV, Bilanzen)			
Personalstruktur			
Erhebung/Auflösung von Beiträgen			
Erhalt/ Auflösung von Fördermitteln			
Sachanlagenwerte			

Durch die jährliche Erhebung des Mikrozensus und Fortschreibung des Zensus stehen wesentliche regionale Daten von M-V seit 1990 in zeitlicher Auflösung von einem Jahr zur Verfügung. Beim Mikrozensus werden u.a. Daten bezüglich des Bevölkerungsstandes (StatA M-V 2017), der Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung (StatA M-V 2016a) und des Bestandes an Wohngebäuden und Wohnungen (StatA M-V 2015) erhoben. Diese Daten sind bei den statistischen Landesämtern (in M-V ist seit 2006 das Landesamt für innere Verwaltung LAiV, ehemals Statistisches Landesamt StatA, zuständig) selbst oder auf der „Regionaldatenbank Deutschland“ der statistischen Ämter des Bundes und der Länder von der regionalen Ebene bis hin zur Gemeindeebene abrufbar. Ein Überblick über die beim LAiV erhobenen Datensätze, deren Informationsinhalt, Detaillierungsgrad und zur Verfügung stehenden Zeiträume, ist in Anhang 2 aufgeführt. Für die Unterrubrik „öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung“ der Umweltstatistik des Bundes (zum Zweck der Umweltpolitik und zur Erfüllung europa- und völkerrechtlicher Berichtspflichten), deren Daten in einem Intervall von drei Jahren erhoben werden, sind auf den genannten Plattformen die Informationen lediglich auf Kreisebene öffentlich zugänglich. Jedoch werden diese Daten von den zuständigen Ämtern auf Gemeindeebene erhoben, weshalb eine direkte Abfrage beim LAiV erfolgte. Über den AGS können die Informationen den Gemeinden zugeordnet werden. Darin enthalten sind u.a. die Daten zur „Erhebung der öffentlichen Abwasserbehandlung“ (StatA M-V 2012a) und zur „Erhebung der öffentlichen Abwasserentsorgung“ (StatA M-V 2012b). Der ebenfalls darin enthaltene Datensatz der „Wasser- und Abwasserentgelte für die öffentliche Wasserversorgung

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

---

und Abwasserentsorgung“ ist wiederum auf der Plattform des LAiV (StatA M-V 2011b) auf Gemeindeebene öffentlich zugänglich. Eine Übersicht über die direkt beim LAiV abgefragten Datensätze der Umweltstatistik aus der Rubrik „Wasserversorgung und Abwasserentsorgung“ und deren Informationsinhalt, Detaillierungsgrad sowie zur Verfügung stehenden Zeiträume ist in Anhang 3 zusammengefasst.

Das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) in M-V betreibt das auf Open-Source-WebGIS basierende Fachinformationssystem „Wasser“ zur Überwachung sowie zur Ermittlung der Abwasserabgabe. Die in dem System enthaltenen objektbezogenen Daten, über Lage, Auslastung, Zu- und Ablaufkonzentrationen sämtlicher kommunaler KA in M-V, sind nicht öffentlich zugänglich, weshalb beim LUNG eine direkte Abfrage der Daten erfolgte.

Aus den Jahresabschlüssen der Aufgabenträger sind die Finanzdaten zur Abbildung der Kostenstruktur sowie der Sachanlagenwerte und die Summe der Verbindlichkeiten aus Gewinn- und Verlustrechnung (GuV) und Bilanz zu entnehmen. Die Jahresabschlüsse sind bei den Aufgabenträgern direkt abzufragen. Einige Aufgabenträger veröffentlichen ihre Jahresabschlüsse online beim Bundesanzeiger ([www.bundesanzeiger.de](http://www.bundesanzeiger.de)). Durch die Zusammenarbeit mit dem in dieser Untersuchung betrachteten Aufgabenträger, wurden die Jahresabschlüsse von 2001, 2010 und 2014 zur Verfügung gestellt.

Hinsichtlich fehlender notwendiger Informationen bei den objektbezogenen KA- und Finanzdaten wurden weitere Daten bezüglich der Finanzierung, Organisationsstruktur, Betriebsführung, KA und des SWEN beim Aufgabenträger über ein Formular (Anhang 1) abgefragt. Das Formular wurde so konzipiert, dass basierend auf den bereits vorhandenen Daten der Ämter und aus den Jahresabschlüssen der Aufgabenträger (auf Grundlage der Untersuchung von Gießler und Tränckner 2014, MLUV M-V 2008, LRH M-V 2004), die fehlenden Informationen zur groben Abbildung der Kosten- und Infrastrukturen der Aufgabenträger abgefragt werden.

Begründet durch den Beginn dieser Untersuchung und der vorhergehenden Studie von Gießler und Tränckner (2014) sowie der Datensatzverfügbarkeit der Umweltstatistik in der Rubrik „Wasserversorgung und Abwasserentsorgung“ zum Untersuchungszeitpunkt (Veröffentlichung der Statistik in 2013), wurde 2010 als Basisjahr festgelegt. Für dieses Jahr lagen sämtliche Informationen und somit ein kompletter Datensatz vor. Basierend auf diesem Datensatz wurden fehlende Informationen für 2001, dem Ausgangsjahr der Validierung, anhand einer inversen Betrachtung ermittelt. Für 2014 - gleichzeitig Vergleichsjahr der Validierung und Bezugsjahr der Prognosesimulation - wurden die Informationen durch die Angaben des Aufgabenträgers ergänzt und vervollständigt.

Zur Verdeutlichung unterschiedlicher Einkommensentwicklungen in Deutschland erfolgte eine Betrachtung der durchschnittlichen Einkommensentwicklung in M-V sowie in West- und Ost-Deutschland (StatBA 2018, StatBA 2017a). Aus der öffentlich zugänglichen Statistik des Landes wurden für die Ermittlung der Reallohnentwicklung das Bruttoeinkommen (StatA M-V 2016b) und verfügbares Einkommen (StatA M-V 2016c) für die Jahre 2000 bis 2014 abgerufen. Durch Extrapolation der Reallohnentwicklung wurde die Gehaltsentwicklung in M-V bis zum Prognosehorizont 2050 (siehe Anhang 4) fortgeschrieben.

### 4.3 Festlegung der Rahmenparameterwerte

#### 4.3.1 Auswahl der Rahmenparameter

Die Rahmenparameter definieren die äußeren Bedingungen, auf welche die Abwasserwirtschaft keinen Einfluss hat, sondern nur reagieren kann bzw. sich anpassen muss. Für die Definition des äußeren Rahmens wurden fünf Parameter aus den Bereichen Sozioökonomie und Wirtschaft ausgewählt. Bezogen auf den Untersuchungsschwerpunkt steht als wesentliche Betrachtungsgröße die die Entwicklung der *Bevölkerung* im Mittelpunkt. Diese beeinflusst den häuslichen Schmutzwasseranfall, welcher sich auf die Auslastung der Systeme und Anlagen auswirkt. Neben der Bevölkerungsentwicklung kann durch technische Innovationen oder durch eine stark alternde *Bevölkerung* eine Reduktion des häuslichen *Wasserverbrauchs* eintreten. Eine Veränderung des häuslichen *Wasserverbrauchs* führt gleichermaßen zur Veränderung des häuslichen Schmutzwasseranfalls. Durch den mengenbezogenen Trinkwasserverbrauchsmaßstab als Verrechnungsgröße für die Schmutzwassergebühr wirkt sich der *Wasserverbrauch* der Haushalte unmittelbar auf die Schmutzwassergebührentwicklung aus. Neben dem häuslichen Schmutzwasseranteil umfasst die Gesamtschmutzwassermenge auch einen Anteil aus dem Gewerbe- und der Industrie. Je nach Region und Gemeinde variiert dieser Anteil stark und kann einen Großteil der Gesamtschmutzwassermenge ausmachen. Deshalb ist die Entwicklung von *Gewerbe- und Industrie* als wesentlicher Faktor für die Systemauslastung und Gebührenstabilität als Rahmenparameter enthalten. Zur Beschreibung der zukünftigen wirtschaftlichen Bedingungen sind die Rahmenparameter *Inflation* und *Kreditzinssatz* für die Finanzierung der Systeme und Anlagen enthalten.

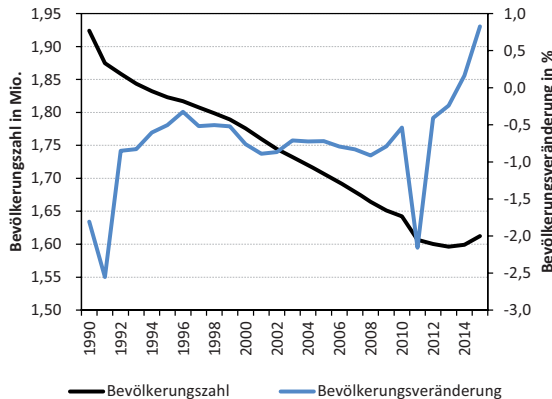
#### 4.3.2 Analyse und Auswertung von statistischen Langzeitreihen

Die statistische Analyse und Auswertung der Langzeitreihen der Rahmenparameter dient der Eingrenzung für die Rahmenparameterspannweiten, in deren Wertebereich die Prognosesimulationen erfolgen. Das Ziel ist durch diesen Arbeitsschritt zukünftige Rahmenbedingungen zu konzipieren, welche sich mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ereignen. Für die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Werten aus den Langzeitreihen sind diese auf Normalverteilung zu überprüfen. Denn nur bei einer vorliegenden Normalverteilung ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens aus der Verteilungs- und Dichtefunktion bestimmbar. Durch den Nachweis einer vorliegenden Normalverteilung für alle Rahmenparameter, kann die Aussagekraft der Ergebnisse aus der MCS durch die Erzeugung von normalverteilten Pseudo-Zufallszahlen verstärkt werden.

Für die Überprüfung ob eine Normalverteilung vorliegt wurden die Zeitreihen der Rahmenparameter mittels Chiquadrat ( $X^2$ )- oder Kolmogorov-Smirnov (K-S)-Anpassungstest untersucht (siehe Anhang 5 und Anhang 6). Für die Durchführung des  $X^2$ -Tests werden die Merkmalsausprägungen zuvor in Klassen eingeteilt. Bei Ablehnung der Nullhypothese des  $X^2$ -Tests erfolgt anschließend die Anwendung des K-S-Tests für die nichtklassifizierten Merkmalsausprägungen. Die Auswertung der Anpassungstest für die einzelnen Rahmenparameter erfolgt nachstehend.

##### **Bevölkerungsentwicklung**

Die Bevölkerungszahlen aus der Langzeitreihe vom StatA M-V (2017) als auch die daraus ermittelte jährliche relative Bevölkerungsentwicklung sind illustriert in Abbildung 4-2.



**Abbildung 4-2:** Bevölkerungszahl und relative Bevölkerungsentwicklung in M-V

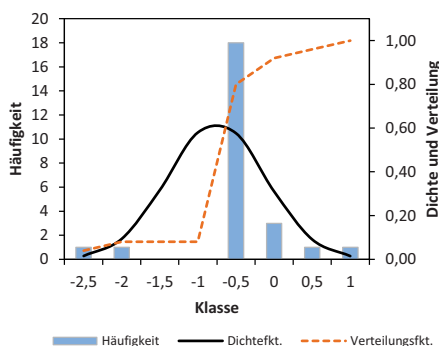
In den Jahren von 1990 bis 2014 nahm die Bevölkerung in M-V um 19,4 % von ca. 1,96 Mio. auf 1,61 Mio. Einwohner ab. Dies ergibt eine jährliche relative Bevölkerungsentwicklung im Mittel von  $-0,72 \% a^{-1}$ . Dabei lagen Schwankungen in den Jahren von  $-2,55 \% a^{-1}$  bis  $0,83 \% a^{-1}$  vor. Im Betrachtungszeitraum der Validierung des Modells (2001 bis 2014) betrug die jährliche relative Bevölkerungsentwicklung  $-0,76 \% a^{-1}$  mit Verlagerung der Minima und Maxima auf  $-2,16 \% a^{-1}$  bzw.  $0,16 \% a^{-1}$ . Seit 2014 nimmt die Bevölkerungszahl im Land wieder leicht zu.

Für die Prüfung, ob eine Normalverteilung bei der Bevölkerungsentwicklung vorliegt, wurde die relative jährlichen Bevölkerungsentwicklung und nicht die Bevölkerungszahl für die Testverfahren zu Grunde gelegt. Die Spannweite der Werte innerhalb des Zeitraumes bedingt eine Einteilung in acht Klassen für den  $\chi^2$ -Test. Die Häufigkeiten sowie die Verteilungs- und Dichtefunktionswerte sind aufgelistet in Tabelle 4-2 und grafisch in Abbildung 4-3 aufgeführt.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

**Tabelle 4-2:** Häufigkeitsverteilung, Werte der Verteilungs- und Dichtefunktion der jährlichen relativen Bevölkerungsentwicklung

Bev. (% a <sup>-1</sup> )	Häufigkeit	Verteilungs- fkt.	Dichtefkt.
-2,5	1	0,04	0,01
-2	1	0,08	0,09
-1,5	0	0,08	0,32
-1	0	0,08	0,58
-0,5	18	0,80	0,58
0	3	0,92	0,31
0,5	1	0,96	0,09
1	1	1,00	0,01



**Abbildung 4-3:** Häufigkeiten, Dichte- und Verteilungsfunktion der jährlichen relativen Bevölkerungsentwicklung

Basierend auf den Einstellungen in Tabelle 4-3 und der Klasseneinteilung und Häufigkeitsverteilung wurde das dargestellte Testresultat ermittelt.

**Tabelle 4-3:** Einstellungen und Testergebnis des  $\chi^2$ -Test für die Bevölkerungsentwicklung

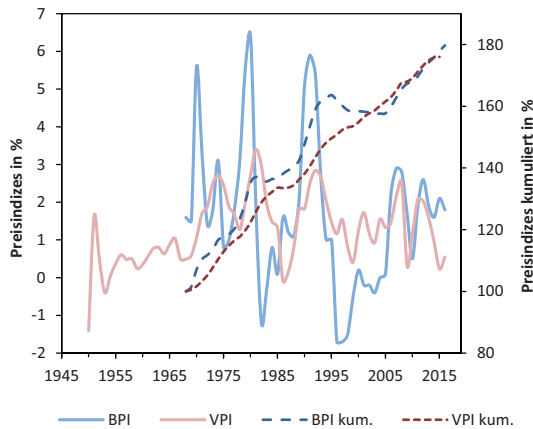
Testverfahren	df bzw. n	P (1- $\alpha$ ) $\alpha = 0,05$	Prüfgröße	Testgröße	Resultat
$\chi^2$	5	0,95	36,41	11,07	$\sim N_v$
K-S	25	0,95	0,243	0,259	$N_v$

Gemäß dem  $\chi^2$ -Test wird die Nullhypothese für die dargestellte Klasseneinteilung der Bevölkerungsentwicklung mit einem Erwartungswert von  $-0,48 \% a^{-1}$  bei einem Signifikanzniveau von 5 % verworfen. Somit liegt eine Normalverteilung nicht vor. Dies ist der kurzen Zeitreihe und den damit verbundenen wenigen Beobachtungswerten geschuldet. Die Prüfung der Beobachtungswerte mittels K-S-Test ergab, dass die Ablehnung der Nullhypothese verworfen werden muss. Nach den Testkriterien des K-S-Test sind die Werte normalverteilt. Der Erwartungswert beträgt  $-0,74 \% a^{-1}$ .

#### Inflationsrate

Die Langzeitreihen der Verbraucherpreis- und Baupreisdaten entstammen vom statistischen Bundesamt (StatBA 2017b, StatBA 2017c). In Abbildung 4-4 sind sowohl die aus den Werten der Indizes abgeleiteten jährlichen Entwicklungsraten als auch deren kumulative Fortführung ab 1968 (als Bezugsjahr = 100 %) abgebildet.





**Abbildung 4-4:** VPI und BPI Entwicklung sowie die kumulierten Summen ab 1969

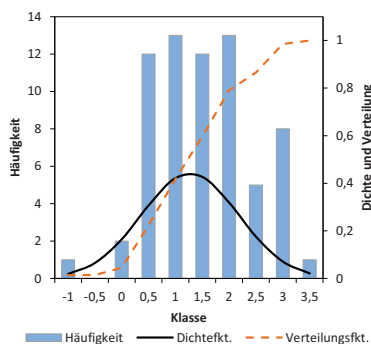
Bei den Verbraucherpreisdaten sind für den Zeitraum von 1950 bis 2016 vorhanden. Innerhalb des Zeitraums schwankte die Preisveränderung von -1,4 bis 3,4 Prozentpunkte. Im Mittel lag eine Inflation von  $1,3 \% a^{-1}$  vor. Für die Baupreise wurde der Preisindex für Bauanlässe angesetzt. Die Zeitreihe liegt für den Zeitraum von 1968 bis 2016 vor. In diesem Zeitraum schwankte die Preisveränderung von -1,7 bis 6,4 Prozentpunkte. Im Mittel betrug die Inflation  $1,6 \% a^{-1}$ . Somit weist die Baupreisentwicklung größere Schwankungen auf. Die kumulierten Inflationsraten beider Indizes ab dem Jahr 1968 nähern sich ca. 180 Prozentpunkte (VPI = 177 Prozentpunkte, VBI = 180 Prozentpunkte). Für den Betrachtungszeitraum der Validierung des Modells (2001 bis 2014) beträgt die Inflation des VPI im Mittel  $1,5 \% a^{-1}$  in einer Spanne von 0,3 bis 2,5 Prozentpunkte. Beim BPI beträgt die Inflation im Mittel  $1,6 \% a^{-1}$  in einer Spanne von -0,4 bis 2,9 Prozentpunkte.

Im Folgenden werden zunächst das Vorgehen und die Testergebnisse des VPI und anschließend des BPI aufgeführt. Für die Prüfung auf Normalverteilung beim VPI wurde die Entwicklungsrate aus dem Index in zehn Klassen eingeteilt. Die Häufigkeiten sowie die Verteilungs- und Dichtefunktionswerte sind aufgelistet in Tabelle 4-4 und grafisch in Abbildung 4-5 aufgeführt.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

**Tabelle 4-4:** Häufigkeitsverteilung, Werte der Verteilungs- und Dichtefunktion der jährlichen Veränderungsrate des VPI

$\Delta VPI$ (% a <sup>-1</sup> )	Häufigkeit	Verteilungs- fkt.	Dichtefkt
-1	1	0,01	0,02
-0,5	0	0,01	0,07
0	2	0,05	0,16
0,5	12	0,22	0,31
1	13	0,42	0,42
1,5	12	0,60	0,43
2	13	0,79	0,32
2,5	5	0,87	0,18
3	8	0,99	0,07
3,5	1	1,00	0,02



**Abbildung 4-5** Häufigkeiten, Dichte- und Verteilungs-funktion der jährlichen Veränderungsrate des VPI

Basierend auf den Einstellungen aus Tabelle 4-5 und der Klasseneinteilung und Häufigkeitsverteilung wurde das dargestellte Testresultat ermittelt.

**Tabelle 4-5:** Einstellungen und Testergebnis des  $\chi^2$ -Test für den VPI

Testverfahren	df bzw. n	P (1- $\alpha$ ) $\alpha = 0,05$	Prüfgröße	Testgröße	Resultat
$\chi^2$	7	0,95	11,11	14,07	Nv

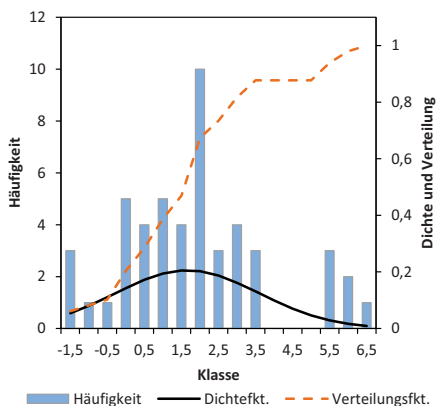
Der  $\chi^2$ -Test ergab, dass es sich bei der dargestellten Klasseneinteilung des VPI und einem Signifikanzniveau von 5 %, um eine Normalverteilung handelt. Der Erwartungswert beträgt 1,52 % a<sup>-1</sup>.

Für die Prüfung auf Normalverteilung beim BPI wurde die Entwicklungsrate aus dem Index in 17 Klassen eingeteilt. In Tabelle 4-6 sind die Häufigkeiten als auch die Verteilungs- und Dichtefunktionswerte aufgeführt und Abbildung 4-6 grafisch dargestellt.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

**Tabelle 4-6:** Häufigkeitsverteilung, Werte der Verteilungs- und Dichtefunktion der jährlichen Veränderungsrate des BPI

$\Delta BPI$ (% a <sup>-1</sup> )	Häufigkeit	Verteilungs- fkt.	Dichtefkt.
-1,5	3	0,06	0,05
-1,0	1	0,08	0,08
-0,5	1	0,10	0,11
0	5	0,20	0,14
0,5	4	0,29	0,17
1	5	0,39	0,19
1,5	4	0,47	0,21
2	10	0,67	0,20
2,5	3	0,78	0,19
3	4	0,81	0,16
3,5	3	0,88	0,13
4	0	0,88	0,10
4,5	0	0,88	0,07
5	0	0,88	0,05
5,5	3	0,94	0,03
6	2	0,98	0,02
6,5	1	1,00	0,01



**Abbildung 4-6:** Häufigkeiten, Dichte- und Verteilungsfunktion der jährl. Veränderungsrate des BPI

Unter den in Tabelle 4-7 festgelegten Testbedingungen für den X<sup>2</sup>- und K-S-Test ergeben sich die dargestellten Resultate.

**Tabelle 4-7:** Einstellungen und Testergebnisse des X<sup>2</sup>- und K-S-Test für den BPI

Testverfahren	df bzw. n	P (1- $\alpha$ ) $\alpha = 0,05$	Prüfgröße	Testgröße	Resultat
X <sup>2</sup>	14	0,95	24,69	23,69	¬Nv
K-S	67	0,95	0,13	0,20	Nv

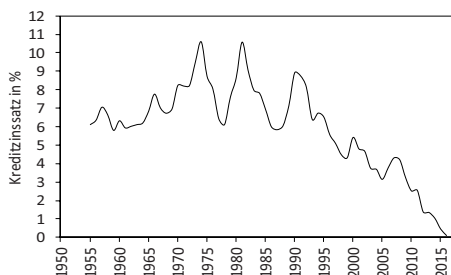
Der X<sup>2</sup>-Test ergab, dass es sich bei der dargestellten Klasseneinteilung des BPI mit einem Erwartungswert von 1,88 % a<sup>-1</sup> und einem Signifikanzniveau von 5 %, um keine Normalverteilung handelt. Die Prüfung der Beobachtungswerte mittels K-S-Test ergab hingegen, dass die Annahme einer Normalverteilung (Nullhypothese) nicht verworfen werden muss. Der Erwartungswert liegt hier bei 1,66 % a<sup>-1</sup>.

#### Kreditzinssatz

Gebietskörperschaften beschaffen sich Kapital in Form von Kommunalkrediten (auch Kommunal-darlehen genannt), dazu zählen Kreisfreie Städte, Gemeinden, Gemeindeverbände, Eigenbetriebe und auch Körperschaften des öffentlichen Rechts. Durch die Besonderheit, dass aufgrund des jährlichen horizontalen und vertikalen Finanzausgleichs zwischen Bund, Ländern und Kommunen kein Eigenkapital für diese Kreditform unterlegt werden muss (Kreditrisiko-Standardansatz von 0 %), sind die Kredit- bzw. Darlehenszinsen auf dem niedrigsten am Kapitalmarkt verfügbaren Niveau (Rehm und Matern-Rehm 2010, Rösler et al. 2002).

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Aufgrund der Unzugänglichkeit von Zeitreihen bzgl. der Kommunalkreditzinssätze wurden für die Untersuchung die Umlaufrenditen der inländischen Inhaberschuldverschreibungen aus Anleihen der öffentlichen Hand (Deutsche Bundesbank 2017) als Kreditzinssatz angenommen. Die Daten liegen für den Zeitraum von 1956 bis 2016 vor und sind in Abbildung 4-7 dargestellt.



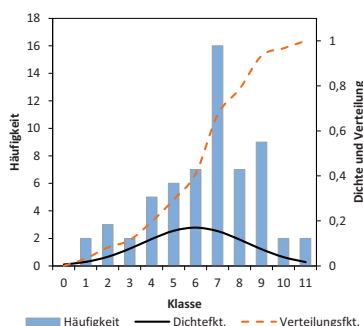
**Abbildung 4-7:** Entwicklung der Umlaufrenditen der inländischen Inhaberschuldverschreibungen aus Anleihen der öffentlichen Hand von 1956-2016

Innerhalb dieses Zeitraumes schwankte der Kreditzinssatz von  $0,1 \% a^{-1}$  bis  $10,6 \% a^{-1}$ . Im arithmetischen Mittel lag dieser bei  $6,2 \% a^{-1}$ . Seit 1994 befindet sich der Kreditzinssatz in einem Abwärtstrend. Im Betrachtungszeitraum der Validierung des Modells (2001 bis 2014) betrug der Kreditzinssatz im Mittel  $3,5 \% a^{-1}$ , während das Maximum  $4,8 \% a^{-1}$  betrug. Bei Betrachtung der letzten 10 Jahre verringert sich der Mittelwert auf  $2,5 \% a^{-1}$ .

Für die Prüfung auf Normalverteilung wurde die Veränderungsrate des Kreditzinssatzes in 11 Klassen eingeteilt. In Tabelle 4-8 sind die Häufigkeiten als auch die Verteilungs- und Dichtefunktionswerte aufgeführt und Abbildung 4-8 grafisch dargestellt.

**Tabelle 4-8:** Häufigkeitsverteilung, Werte der Verteilungs- und Dichtefunktion des Kreditzinssatzes

Zinssatz (% $a^{-1}$ )	Häufigkeit	Verteilungs- fkt.	Dichtefkt.
1	2	0,03	0,02
2	3	0,08	0,05
3	2	0,11	0,08
4	5	0,20	0,12
5	6	0,30	0,16
6	7	0,41	0,17
7	16	0,67	0,15
8	7	0,79	0,12
9	9	0,93	0,07
10	2	0,97	0,04
11	2	1,00	0,02



**Abbildung 4-8:** Häufigkeiten, Dichte- und Verteilungsfunktion des Kreditzinssatzes

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

In Tabelle 4-9 sind die Testbedingungen für den  $\chi^2$ - und K-S-Test sowie die Testresultate enthalten.

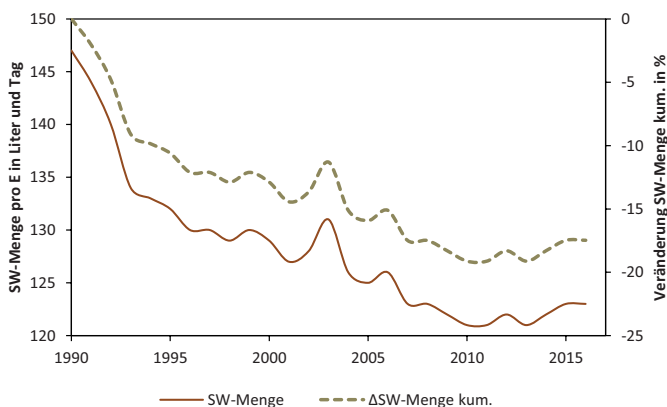
**Tabelle 4-9:** Einstellungen und Testergebnisse des  $\chi^2$ - und K-S-Test für den Kreditzinssatz

Testverfahren	df bzw. n	P (1- $\alpha$ ) $\alpha = 0,05$	Prüfgröße	Testgröße	Resultat
$\chi^2$	8	0,95	14,54	15,51	Nv

Der  $\chi^2$ -Test ergab, dass bei der dargestellten Klasseneinteilung mit einem Erwartungswert von  $6,02 \% a^{-1}$  und einem Signifikanzniveau von  $5 \%$ , eine Normalverteilung vorliegt.

#### Häuslicher Wasserverbrauch

Aus dem häuslichen Wasserverbrauch pro Einwohner und Tag resultiert die Schmutzwassermenge der Haushalte. Für den Wasserverbrauch stehen vom StatBA (2013) die Daten auf nationaler Ebene von 1990 bis 2016 zur Verfügung.



**Abbildung 4-9:** Entwicklung der einwohnerspezifischen häuslichen Wasserverbrauchsmengen

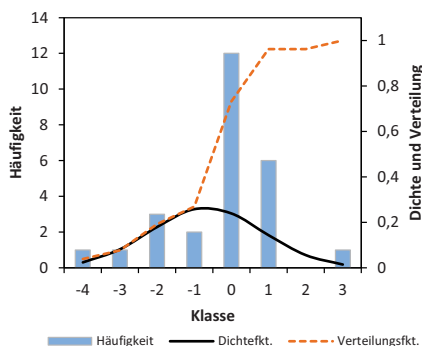
Anhand dieser Daten wurde die Mengenänderung ermittelt. In diesem Zeitraum schwankte die Wasserverbrauchsrate von  $-4,3 \% a^{-1}$  bis  $2,3 \% a^{-1}$  und betrug im arithmetischen Mittel  $-0,8 \% a^{-1}$ . Dies deutet auf eine stetige Abnahme hin. Bei Kumulation der Verbrauchsrate beträgt die Minderung des Wasserverbrauchs für den genannten Zeitraum  $-17,5 \%$ . Im Validierungszeitraum für das Modell (2001 bis 2014) betrug die Wasserverbrauchsrate im Mittel  $-0,4 \% a^{-1}$  in einer Range von  $-3,8 \% a^{-1}$  bis  $2,3 \% a^{-1}$ . Die Wasserverbrauchsveränderung betrug für den Validierungszeitraum insgesamt  $-4,6 \%$ .

Für die Prüfung auf Normalverteilung wurde die jährliche Veränderungsrate des einwohnerspezifischen häuslichen Wasserverbrauchs in 8 Klassen eingeteilt. In

Tabelle 4-10 sind die Häufigkeiten als auch die Verteilungs- und Dichtefunktionswerte aufgeführt und Abbildung 4-10 grafisch dargestellt.

**Tabelle 4-10:** Häufigkeitsverteilung, Werte der Verteilungs- und Dichtefunktion der Veränderung der einwohnerspezifischen häuslichen Wasserverbrauchsmengen

Verbrauch (% a <sup>-1</sup> )	Häufigkeit	Verteilungs- fkt.	Dichtefkt.
-4	1	0,04	0,02
-3	1	0,08	0,08
-2	3	0,19	0,18
-1	2	0,27	0,26
0	12	0,73	0,24
1	6	0,96	0,14
2	0	0,96	0,05
3	1	1,00	0,01



**Abbildung 4-10** Häufigkeiten, Dichte- und Verteilungsfunktion der Veränderung der einwohnerspezif. häusl. Wasserverbrauchsmengen

Die Testbedingungen und die Resultate des  $\chi^2$ - und K-S-Test sind in Tabelle 4-11 festgehalten.

**Tabelle 4-11:** Einstellungen und Testergebnisse des  $\chi^2$ - und K-S-Test für die einwohnerspezifischen häuslichen Wasserverbrauchsmengen

Testverfahren	df bzw. n	P (1- $\alpha$ ) $\alpha = 0,05$	Prüfgröße	Testgröße	Resultat
$\chi^2$	5	0,95	10,64	11,07	Nv

Gemäß dem Ergebnis des  $\chi^2$ -Test wird die Nullhypothese für die dargestellte Klasseneinteilung des Wasserverbrauchs bei einem Signifikanzniveau von 5 % angenommen. Der Erwartungswert beträgt -0,23 % a<sup>-1</sup>.

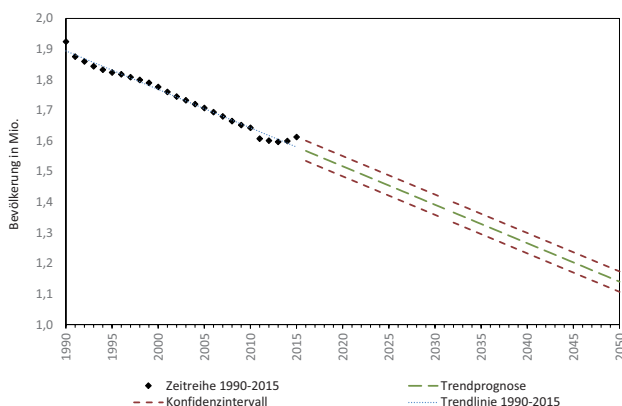
#### 4.3.3 Prädiktion der Rahmenparameterwerte bis zum Prognosehorizont anhand von Zeitreihenmodellen

Die Prädiktion der Rahmenparameter bis zum Prognosehorizont (2050) dient zusammen mit den Analyseergebnissen der Langzeitreihen zur Festlegung der Rahmenbedingungen für die MCS und Szenarien. Anhand der historischen Daten aus den Langzeitreihen wird überprüft ob ein Trend vorliegt. Bei einem vorliegenden Trend wird dieser bis zum Prognosehorizont fortgeschrieben. Auf Grundlage des Konfidenzintervalls wird der zukünftige Wertebereich der Rahmenparameter abgeschätzt. Bei einem vorhandenen linearen Trend findet die Extrapolation in die Zukunft über eine Einfache-Lineare-Regression (ELR) statt. Anhand der ermittelten Schätzfunktion werden die zukünftigen Rahmenparameterwerte ermittelt. Liegt jedoch ein zyklischer oder saisonaler Trend vor, sind andere Zeitreihenmodelle anzuwenden, welche die Schwankungen abbilden können. In der vorliegenden Arbeit wurde basierend auf einer saisonalen Trendanalyse ein multiplikatives Zeitreihenmodell angewendet.

## ELR der Bevölkerungsentwicklung

Das Ministerium für Energie, Infrastruktur und Landesentwicklung von M-V veröffentlichte in 2012 eine Aktualisierung der 4. Landesprognose (MEIL M-V 2012) zur Bevölkerungsentwicklung. Diese basierte auf der Datengrundlage zur Bevölkerung in M-V von 2010. Diese Landesprognose prognostiziert die Bevölkerungsentwicklung bis 2030. Der Prognosehorizont der vorliegenden Arbeit reicht bis zum Jahr 2050. Zum einen ist der Betrachtungszeitraum der Landesprognose nicht ausreichend und zum anderen ist die Flüchtlingswelle von 2015 in dieser Prognose nicht berücksichtigt. Denn in 2015 sind 23.080 Flüchtlinge nach M-V zugezogen. Jedoch ist lediglich jeder dritte Flüchtling in M-V geblieben (LPB M-V 2016). Für die Prädiktion der Bevölkerungsentwicklung der vorliegenden Untersuchung wurden die Daten der Bevölkerungsfortschreibung des statistischen Landesamtes zum Stand 31.12.2015 verwendet. In den Daten ist der Zuzug der Flüchtlinge enthalten. Im Gegensatz zur komplexen Methodik des statistischen Landesamtes wurde in dieser Arbeit für die Prädiktion vereinfachend eine aus der ELR ermittelten Schätzfunktion ( $R^2=0,985$ ) angewendet. Die Veröffentlichung der 5. Landesprognose (MEID M-V 2019) mit Grundlage des Bevölkerungsstands vom 31.12.2017 und einem Prognosehorizont bis 2040 erfolgte im August 2019 und konnte dieser Untersuchung nicht zu Grunde gelegt werden. Als grundlegende Aussage der aktuellen zur vorherigen Landesprognose ist, dass der prognostizierte Bevölkerungsrückgang nicht so groß sein wird wie zunächst angenommen, jedoch bleiben die generellen Trends der Bevölkerungsentwicklung mit einem zeitlichen Verzug bestehen (MEID M-V 2019).

In Abbildung 4-11 ist die Bevölkerungsentwicklung bis 2015 und die anschließende Schätzung der weiteren Entwicklung bis 2050 mittels ELR dargestellt.



**Abbildung 4-11: ELR-Prädiktion der Bevölkerungsentwicklung in M-V bis 2050**

Auf Grundlage der Schätzfunktion wurde ausgehend von 2015 eine durchschnittliche Bevölkerungsentwicklung von -13,7 % auf 1,391 Mio. Einwohner bis 2030 abgeleitet. Für 2030 beträgt die

Spannweite des Konfidenzintervalls -11,7 % bis -15,8 %. Bis 2050 schrumpft die Bevölkerung um 0,472 Mio. Einwohner (ausgehend von 2015) auf 1,114 Mio. Einwohner (-29,2 %). Das Konfidenzintervall liegt im Bereich zwischen 1,107 Mio. (-27,2 %) und 1,173 Mio. (-31,3 %) Einwohner. Ausgehend vom Bezugsjahr 2015 bis zum Prognosehorizont entspricht dies einer mittleren jährlichen Bevölkerungsentwicklung von  $-0,8 \% a^{-1}$ . In der Summe der durchgeführten Prognosestudien (MEIL M-V 2012, Scholz et al. 2008, Sommer 2004) schwankt die ermittelte Bevölkerungsentwicklung in M-V bis 2030 zwischen -5,1 % bis -29,5 %, bis 2050 zwischen -21,7 % und -37,6 %. Die anhand der Extrapolation der Einfachen-Linearen-Regressiongleichung (ELRG) ermittelte Bevölkerungsentwicklung weist mit -3,8 % die geringste Abweichung zur Variante 1 „Kontinuität bei schwächerer Zuwanderung“ der Bevölkerungsvorausberechnung des StatBA (2015), im Vergleich aller genannten Studien, auf. In Anbetracht aller Studien liegt eine mittlere Abweichung bis 2030 von -4,7 % und bis 2050 bis -7,3 % vor. Hinsichtlich Simplizität der Extrapolation mittels ELRG im Vergleich zu den komplexeren Ansätzen der anderen Studien, zeichnen die Prognosen alle ein ähnliches Zukunftsbild. In Anbetracht der 5. Landesprognose wurde diese Entwicklung etwas abgeschwächt, der Trend einer schrumpfenden Bevölkerung bleibt jedoch erhalten. Die regionale Entwicklung wird dabei unterschiedlich geprägt sein. Besonders die ländlichen Gebiete werden stark betroffen sein, aber auch die Städte im Osten und Süd-Osten von M-V (MEID M-V 2019).

## ELR der Inflationsrate

Die Extrapolation des VPI und BPI erfolgte ebenfalls anhand der Schätzfunktion der ELRG. Das Bestimmtheitsmaß beim VPI beträgt  $R^2=0,979$  und beim BPI  $R^2=0,922$ . In Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13 sind die historischen Zeitreihen des VPI und BPI sowie deren Prädiktion bis 2050 abgebildet.

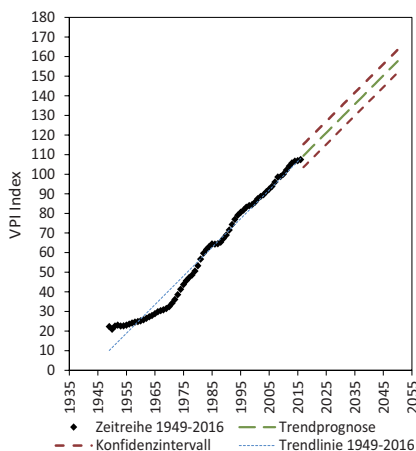


Abbildung 4-12: ELR-Prädiktion des VPI bis 2050

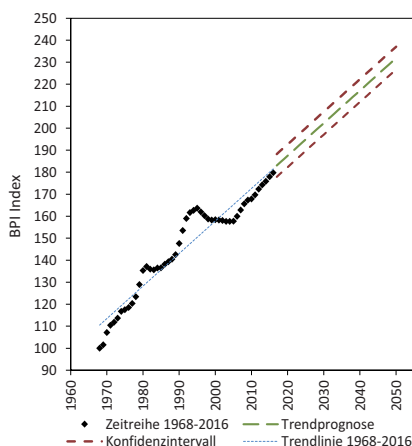


Abbildung 4-13: ELR-Prädiktion des BPI bis 2050

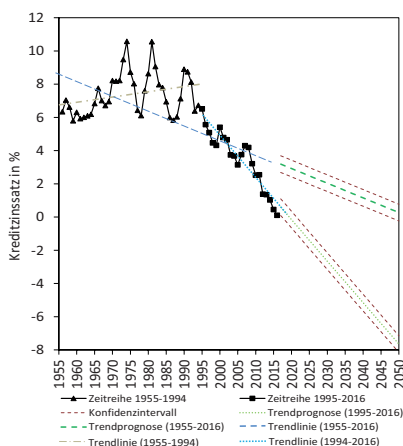


Bis 2050 steigt gemäß der ELRG der VPI um 48,2 Indexpunkte, dies entspricht einer mittleren jährlichen Inflation von  $1,48\% \text{ a}^{-1}$ . Für das untere und obere Konfidenzniveau entspräche dies  $1,30\% \text{ a}^{-1}$  bis  $1,65\% \text{ a}^{-1}$ . Bezogen auf den Mittelwert der historischen Zeitreihe des VPI ab 1949 mit  $1,27\% \text{ a}^{-1}$ , welcher in etwa auch dem arithmetischen Mittelwert ( $1,33\% \text{ a}^{-1}$ ) des Zeitraumes ab der Währungsumstellung zum Euro in 2002 entspricht, liegt der prognostizierte Wert um 0,21 Prozentpunkte höher. Der BPI steigt bis 2050 um 52,2 Indexpunkte. Daraus resultiert eine mittlere jährliche Inflation von  $1,53\% \text{ a}^{-1}$ . Das untere und obere Konfidenzniveau liegt abgeleitet bei  $1,38\% \text{ a}^{-1}$  bis  $1,69\% \text{ a}^{-1}$ . Der prognostizierte arithmetische Mittelwert entspricht mit einer Abweichung von 0,13 Prozentpunkten dem Mittelwert ( $1,43\% \text{ a}^{-1}$ ) des BPI ab 2002 bis 2016. Mit einer Abweichung von 0,05 Indexpunkten über dem unteren Konfidenzniveau liegt der Mittelwert des BPI im Konfidenzintervall.

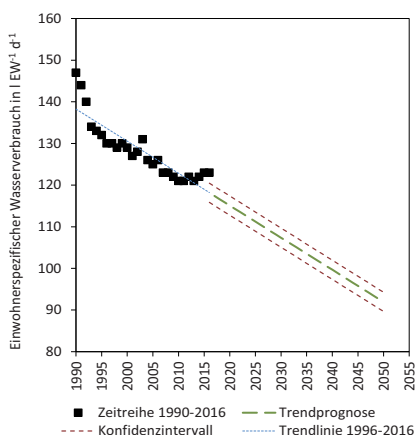
### ELR des Kreditzinssatzes und des häuslichen Wasserverbrauchs

In der Langzeitreihe der Kreditzinssätze lässt sich der Trend über den gesamten Zeitraum in zwei Trends unterteilen. Für die Schätzfunktion des gesamten Zeitraumes (1956 bis 2016) beträgt das Bestimmtheitsmaß  $R^2=0,454$ . Hinsichtlich des Anstiegsverhaltens wurde von 1955 bis 1994 der erste Trend und von 1995 bis 2016 wegen des negativen Anstiegs der zweite Trend separiert. Das abgeleitete Bestimmtheitsmaß der ELRG für den ersten Trendabschnitt beträgt  $R^2=0,090$  und für den zweiten  $R^2=0,873$ . Die ELRG des häuslichen einwohnerspezifischen Wasserverbrauchs weist ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,790$  auf.

In Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15 sind die Trends sowie deren Fortführung der Kreditzinssätze und des häuslichen einwohnerspezifischen Wasserverbrauchs dargestellt.



**Abbildung 4-14:** ELR-Prädiktion durch des Kreditzinssatzes bis 2050



**Abbildung 4-15:** ELR-Prädiktion des häusl. einwohnerspez. Wasserverbrauchs in D bis 2050

Bei Extrapolation, der aus der Langzeitreihe abgeleiteten ELRG bis 2050 resultiert ein mittlerer Kreditzinssatz von 0,28 % a<sup>-1</sup>. Aus der Trendfortführung des separierten Trendabschnitts von 1955 bis 1994 ergibt sich ein Kreditzinssatz für 2050 von 9,88 % a<sup>-1</sup>. Dies führt zu einem überhöhten Kreditzinssatz nahe dem historischen Maximum der Langzeitreihe ab 1956 von 10,60 % a<sup>-1</sup>. Aus gegenwärtiger Sicht ein eher unwahrscheinlicher Kreditzinssatz. Besonders unter dem Aspekt, dass über den gesamten Betrachtungszeitraum ein mittlerer Kreditzinssatz von 9,34 % vorliegen würde und die historische Zeitreihe aufgezeigt hat, dass solche Extrema ausschließlich über kurze Zeiträume bestehen (1 bis 4 Jahre). Die Extrapolation des zweiten Trendabschnitts von 1995 bis 2016 führt zu einem unwahrscheinlichen negativen Kreditzinssatz von -7,55% a<sup>-1</sup>. Anhand der ELRG aus der gesamten Langzeitreihe resultiert über den gesamten Betrachtungszeitraum ein mittlerer Kreditzinssatz von 1,72 % a<sup>-1</sup>. Über die zukünftige Entwicklung der Baudarlehenzinssätze sind hinsichtlich der vielen schwerabschätzbaren Faktoren, keine Studien präsent, weshalb keine Einschätzung bzgl. der Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Kreditzinssatzes erfolgen kann. Doch ist das Fortfahren der negativen Kreditzinsentwicklung aus heutiger Sicht sehr unwahrscheinlich.

Der mittlere häusliche einwohnerspezifische Wasserverbrauch reduziert sich gemäß Extrapolation der ELRG bis 2050 auf 92 l E<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (-22,2 %). Das untere und obere Konfidenzniveau befindet sich 2050 bei 90 l E<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> bis 94 l E<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. Solche Durchschnittsverbräuche sind hauptsächlich in ländlichen Regionen bereits gegenwärtig (StatA M-V 2011a). Begründet durch klimatische Veränderungen kann es in der Zukunft zu steigenden (durch Bewässerung, Anpassung der Körperpflege etc.) oder weiter sinkenden (durch Wasserknappheit in Dürreperioden) Wasserverbräuchen führen. Klimatische Veränderungen werden in dieser Untersuchung jedoch nicht betrachtet. Wassereinsparungen durch technische Innovationen wie in den vergangenen Jahrzehnten sind nicht zu erwarten. Das Einsparpotential liegt hier bis 2025 bei 5 % bis 6 % (Tränckner 2013).

## **Multiplikatives Zeitreihenmodell des Kreditzinssatzes und des häuslichen Wasserverbrauchs**

Hinsichtlich erster Anzeichen für eine Trendumkehr bei den Kreditzinsen und beim häuslichen einwohnerspezifischen Wasserverbrauch schien die Verwendung der ELRG-Ergebnisse als Trendprognose der Rahmenparameter für die Modellierung ungeeignet. Zur Verbesserung der Einschätzung möglicher zukünftiger Kreditzinssätze und Wasserverbräuche wurde eine saisonale Trendanalyse, basierend auf dem globalen Ansatz des klassischen multiplikativen Zeitreihenmodells nach (1) durchgeführt (Box et al. 2016, Hamilton 1994).

$$Y_t = S_t \cdot I_t \cdot T_t \quad (1)$$

$Y_t$	Daten aus der Zeitreihe	(-)
$S_t$	saisonale Komponente	(-)
$I_t$	irreguläre Komponente	(-)
$T_t$	Trendkomponente	(-)

Statt der saisonalen Einflüsse wurden bei beiden Rahmenparameter die relativen jährlichen Veränderungen auf regelmäßige und unregelmäßige Zyklen untersucht und gruppiert. Dabei ergab sich die beste Übereinstimmung für die Nachbildung der vergangenen Jahre bei einer Einteilung in drei Kategorien bzw. Zyklenmuster, in Hoch- und Tiefpunkte sowie einen Bereich zwischen den Extrema.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Zur Herleitung der Zeitkomponente ( $T_t$ ) wurden die Daten mittels des gleitenden Mittelwerts (engl. moving average - MA) nach (2) geglättet.

$$MA_t^n = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} Y_t(t-i) \quad (2)$$

MA	Gleitender Mittelwert	(-)
t	Zeitpunkt	(a)
n	Ordnung: Mittelwert von n aufeinander folgenden Beobachtungen	(-)

Die Glättung der Datenreihen erfolgte in dritter Ordnung. Gemäß (3) bildet der Quotient aus den relativen Werten der Zeitreihen und der dazugehörigen gleitenden Mittelwerte das Produkt aus der saisonale Zeitkomponente und der irregulären Komponente.

$$S_t \cdot I_t = \frac{Y_t}{MA_{(t)}} \quad (3)$$

Zur Extraktion der saisonalen bzw. zyklischen Komponente ( $S_t$ ) wurde der Mittelwert aus der saisonalen und irregulären Komponente ( $S_t \cdot I_t$ ) in Abhängigkeit der Zyklusklassen gebildet. Basierend auf (4) findet über den Quotienten der Ausgangsdaten ( $Y_t$ ) und der zyklischen Komponente ( $S_t$ ) die Desaisonalisierung der Daten ( $Y_{ds}$ ) statt.

$$Y_{ds} = \frac{Y_t}{S_t} \quad (4)$$

Desaisonalisierung (a-1)

Anhand der desaisonalisierten Daten wurde der Anstieg der ELRG bestimmt und in (5) für die Berechnung der Trendkomponente integriert.

$$T_t = n_y + m \cdot t \quad (5)$$

m	Anstieg der ELRG	(-)
$n_y$	Schnittpunkt der ELRG	(-)

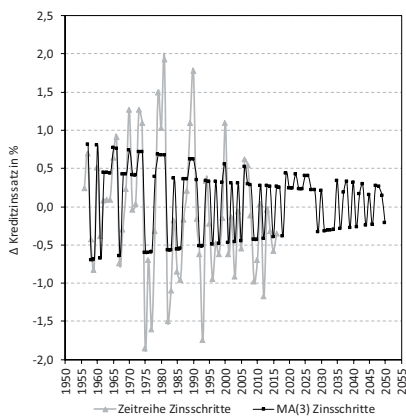
Aus dem Produkt der zyklischen und der Trendkomponente ergeben sich die Schätzwerte ( $Y_p$ ) nach (6).

$$Y_p = S_t \cdot T_t \quad (6)$$

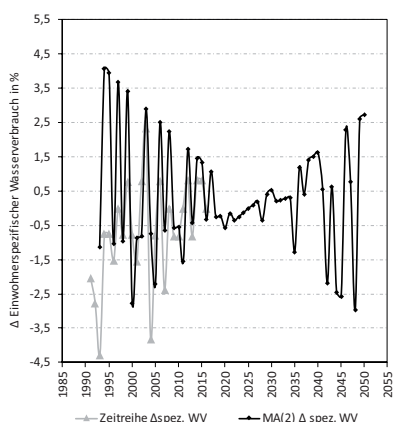
Schätzwert (a)

Für die Prognose der beiden Rahmenparameter bis zum Prognosehorizont mittels dieser Schätzfunktion wurden die zyklische und die Trendkomponente anhand der Zeitachse und der Zyklusklassen fortgeführt.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells



**Abbildung 4-16:** Random-Zyklus-Prädiktion (eine Variation des Zeitreihenmodells + MCS) der relativen Veränderung der Kreditzinssätze in D bis 2050



**Abbildung 4-17:** Random-Zyklus-Prädiktion (eine Variation des Zeitreihenmodells + MCS) der relativen Veränderung einwohnerspez. Wasserverbräuche in D bis 2050

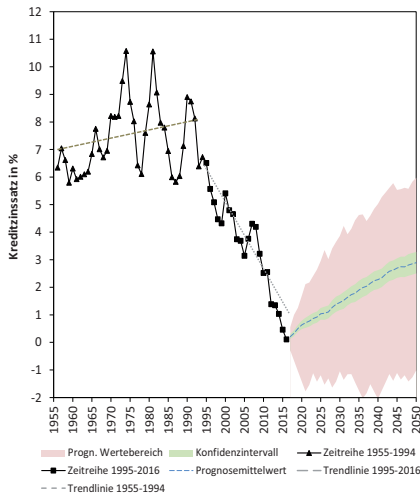
Hinsichtlich der antizyklischen Muster ist die Reihenfolge der zukünftigen Zyklusklassen unbekannt. Zur Bestimmung möglicher Variationen der Zyklusklassen in den einzelnen Jahren und zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Eintretens, wurden für jeden Rahmenparameter 50 Random-Variationsdurchläufe, bei denen durch Zufallsprinzip mögliche Variationen ausgegeben werden, durchgeführt. Aus der resultierenden Ergebnismatrix wurden nach (7) die Konfidenzintervalle bestimmt.

$$KI_{(y)} = \bar{Y}_P \pm z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

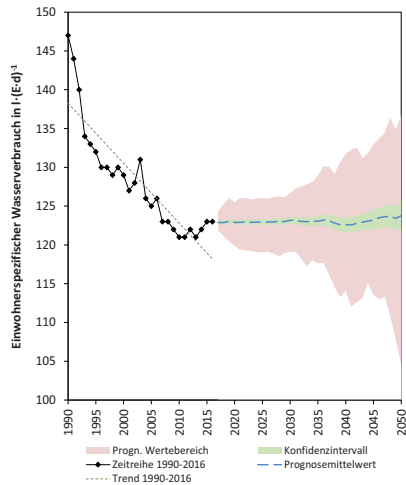
$KI$	Konfidenzintervall	(-)
$\bar{Y}_P$	Mittelwert von $Y_P$	(-)

Die ermittelten Wertebereiche und Konfidenzintervalle aus den Random-Variationsdurchläufen für die Rahmenparameter Darlehenszinsen und häuslicher spezifischer Wasserverbrauch bis zum Prognosehorizont sind in Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19 abgebildet.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells



**Abbildung 4-18:** Kreditzinssätze bis 2050 des multipl. Zeitreihenmodells



**Abbildung 4-19:** Einwohnerspez. Wasserverbräuche bis 2050 des multipl. Zeitreihenmodells

Bei beiden Rahmenparametern weitet sich mit zunehmendem Zeithorizont durch die größer werdende Unsicherheit in der Prädiktion das Konfidenzintervall aus. Gemäß den Ergebnissen der 50 Random-Variationsdurchläufe verläuft beim Zinssatz der 20-jährigen Baudarlehen im ersten Jahr der Schätzung das Intervall nah am Mittelwert ( $0,21 \% a^{-1}$ ) von  $0,12 \% a^{-1}$  bis  $0,29 \% a^{-1}$ . Die Extrema des Wertebereiches betragen  $-0,29 \% a^{-1}$  bis  $0,55 \% a^{-1}$ . In 2050 beträgt der hergeleitete Mittelwert  $2,89 \% a^{-1}$  und das Konfidenzintervall erstreckt sich im Bereich von  $2,50 \% a^{-1}$  bis  $3,28 \% a^{-1}$ , bei Extrema im Wertebereich von  $-1,02 \% a^{-1}$  bis  $5,98 \% a^{-1}$ . Über den Prognosezeitraum resultiert ein gemittelter Kreditzinssatz von  $1,71 \% a^{-1}$ . Die mittleren Kreditzinssätze über den Prognosezeitraum der minimalen und maximalen Wertebereiche betragen  $-1,39 \% a^{-1}$  und  $3,97 \% a^{-1}$ . Für die Kreditzinssätze wurde ein Durchschnittswert über den Prognosezeitraum von  $1,7 \%$  ermittelt.

Beim häuslichen einwohnerspezifischen Wasserverbrauch beträgt der Mittelwert im ersten Jahr der Schätzung  $122,91 E^{-1} d^{-1}$ . Das Konfidenzintervall liegt im Bereich zwischen  $122,71 E^{-1} d^{-1}$  und  $123,11 E^{-1} d^{-1}$ , bei Extrema im Wertebereich von  $121,91 E^{-1} d^{-1}$  und  $124,31 E^{-1} d^{-1}$ . In 2050 beträgt der geschätzte Mittelwert für diesen Rahmenparameter  $123,81 E^{-1} d^{-1}$  ( $-0,6 \%$ ), das Konfidenzintervall verläuft im Bereich von  $122,01 E^{-1} d^{-1}$  ( $-0,8 \%$ ) bis  $125,51 E^{-1} d^{-1}$  ( $2,0 \%$ ), bei Extrema im Wertebereich von  $104,51 E^{-1} d^{-1}$  ( $-15 \%$ ) bis  $136,81 E^{-1} d^{-1}$  ( $11,2 \%$ ). Der Seitwärtstrend der prognostizierten häuslichen einwohnerspezifischen Wasserverbräuche mit den geschätzten Veränderungen von  $-1 \%$  bis  $2 \%$ , entspricht den Ergebnissen von Tränckner (2013).

### 4.3.4 Festlegung der Rahmenparameterwerte für die MCS und Szenarien

#### Festlegung der Rahmenparameterspannweite für die MCS

Die MCS dient zur Abbildung der Bandbreite der zukünftigen Gebührenentwicklung, die sich aus der Variation der Rahmenparameter und deren Spannweiten ergeben. Durch den Nachweis, dass die Langzeitreihen der Rahmenparameter normalverteilt sind, wurden für die MCS Zufallszahlen erzeugt, welche in ihrer Häufigkeit des Auftretens ebenfalls normalverteilt sind (siehe Anhang 7). Dadurch treten Variationen mit den Erwartungswerten der einzelnen Rahmenparameter häufiger auf als Variationen mit den Minimal- und Maximalwerten der Rahmenparameterspannweiten. Aufgrund dieser Häufigkeitsverteilung entspricht der Mittelwert der Mengengebühren, welche sich aus den Rahmenparametervariationen ergeben, dem Erwartungswert. Ausgehend vom Erwartungswert lässt sich der Wahrscheinlichkeitsbereich, in welchem 90 % (bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$ ) der Werte zu erwarten sind, ermitteln. Dieser wird durch die Konfidenzintervalle abgegrenzt.

Für die Erzeugung von normalverteilten Pseudo-Zufallszahlen wurden in einem ersten Schritt die Rahmenparameterspann- und Rechenschrittweiten Tabelle 4-12 festgelegt.

**Tabelle 4-12:** Rahmenparametereinstellung für die MCS

Rahmenparameter	Range (%)	Rechenschrittweite (%)
Bevölkerung	[-50;0]	5
Inflation	[-2;6]	1
Kreditzinssatz	[0;11]	1
Wasserverbrauch	[-10;10]	2,5

Die Zufallszahlen werden innerhalb Rahmenparameterspannweiten (Range) generiert. Diese sind ausgehend vom Erwartungswert der normalverteilten Rahmenparameter zu definieren. Besonders auffällig ist die Spannweite beim Rahmenparameter *Bevölkerung*, welche sich von -50 % bis 0 % erstreckt. Der Erwartungswert aus der Langzeitreihenanalyse beträgt  $-0,75 \% a^{-1}$ . Bis zum Prognosehorizont 2050 resultiert demnach eine Bevölkerungsreduktion von 26 % (ausgehend von 2015). Aufgrund der Rechenschrittweiten von 5 % wurde vereinfachend für die Erzeugung der normalverteilten Zufallszahlen ein Erwartungswert von -25 % (entspricht  $-0,71 \% a^{-1}$ ) festgelegt. Unter dem Aspekt, dass die *Bevölkerung* sich nicht reduziert und konstant bleibt, wurde diese Entwicklung in die Betrachtung eingebunden und als Maximalwert der Spannweite definiert. Ausgehend vom Erwartungswert ist diese Spannweite ebenfalls linksseitig zu übertragen und führt zur Ausprägung des Intervalls bis -50 %. Die Rahmenparameteranalyse der *Inflation* erfolgte anhand der Betrachtung des VPI und BPI. Für die Prognosesimulationen wird die *Inflation* zusammengefasst als ein Rahmenparameter betrachtet. Zum einen ist die zukünftige Entwicklung der *Inflation* von vielen unbestimmbaren äußeren, wirtschaftlichen Faktoren abhängig und zum anderen entwickeln sich die beiden Preisindizes seit 2010 fast identisch (siehe Abbildung 4-4). Abweichend von den Erwartungswerten des VPI (1,5 %) und BPI (1,7 %) wurde der Erwartungswert der *Inflation* für die Erzeugung der normalverteilten Zufallszahlen der MCS in Anlehnung an das ausgeschriebene Ziel der EZB mit 2,0 % festgelegt. Die Rahmenparameterspannweite richtet sich rechtsseitig nach dem Maximalwert des

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

BPI. Davon ausgehend resultiert die linksseitige Spannweite mit -2 %. Beim Rahmenparameter *Kreditzinssatz* entspricht die Rahmenparameterspannweite der Häufigkeitsverteilung aus der Langzeitreihe mit dem Erwartungswert von 6 %. Die Festlegung der Parameterspannweite des Rahmenparameters *Wasserverbrauch* erfolgte anhand der Ergebnisse aus der Trendanalyse des Zeitreihenmodells. Hierfür wurden die Extrema des Wertebereiches zugrunde gelegt. Durch die Rechenschrittweite von 2,5 wurde die Spannweite rechtseitig auf 10 % (statt des Maximalwertes von 11 %) festgelegt. Mit einem Erwartungswert von 0 % resultiert daraus eine linksseitige Spannweite von -10 %. Der Rahmenparameter *Gewerbe und Industrie* wurde, weil dieser unverändert bleibt, vernachlässigt.

Die aufgeführten Spannweiten der Rahmenparameter zeigen deren maximale Ausprägung an. Das Auftreten dieser Werte ist allerdings unwahrscheinlich, weshalb Kombinationen der Rahmenparameter mit diesen Werten zu unwahrscheinlichen Simulationsergebnissen führen. Aus einer großen Spannweite resultiert ebenfalls ein großer Wahrscheinlichkeitsbereich bei den Ergebnissen. Um in einem zweiten Schritt die Bandbreite der Ergebnisse einzugrenzen wurden die Rahmenparameterspannweiten hinsichtlich zu erwartender Werte angepasst. Hierfür wurde die statistische Analyse der Langzeitreihen als auch Literatur zurate gezogen und mit den gegenwertigen Rahmenbedingungen abgeglichen. Die Spannweiten der Rahmenparameter für die MCS zur Eingrenzung der Ergebnisse sind in Tabelle 4-13 beschrieben.

**Tabelle 4-13:** Restriktion der Rahmenparameter und deren Schrittweite für die detailliertere MCS

Rahmenparameter	Range (%)	Rechenschrittweite (%)
Bevölkerung	[-30;-20]	5
Inflation	[0;1,5]	0,5
Kreditzinssatz	[0;2]	0,5
Wasserverbrauch	[-1;2]	1

Zur Restriktion der möglichen Rahmenparameterspannweiten für die MCS, um den Bereich der zukünftigen Mengengebührenentwicklung detaillierter darzustellen, wurde die Spannweite für die Entwicklung der *Bevölkerung* auf -30 % bis -20 % begrenzt. Damit befindet sich die Spannweite nahe der Bevölkerungsentwicklung (26 %), welche sich durch den Erwartungswert ( $-0,74 \% a^{-1}$ ) über den Prognosezeitraum (2015-2050) ergibt. Diese Rahmenparameterspannweite wird zudem vom betrachteten Aufgabenträger als Zielkorridor für die Bevölkerungsentwicklung innerhalb seines Entsorgungsgebietes gesehen. Die Festlegung der Spannweite für die *Inflation* ergibt sich aus dem Mittelwert der Trendanalyse des VPI ( $1,48 \% a^{-1}$ ) und BPI ( $1,53 \% a^{-1}$ ) als auch durch die Schwankungsbreite der Inflation des letzten Jahrzehnts. Die Inflation schwankte in den Jahren zwischen ca.  $0 \% a^{-1}$  bis  $1,5 \% a^{-1}$  (Erwartungswert des VPI). Entsprechend den Ergebnissen des Zeitreihenmodells beträgt das arithmetische Mittel für den *Kreditzinssatz* im Prognosezeitraum  $1,71 \% a^{-1}$ . Zur Eingrenzung der oberen Rahmenparameterspannweite wurde gerundet ein *Kreditzinssatz* von  $2,0 \% a^{-1}$  festgelegt. Die untere Spannweite resultiert aus dem gegenwärtigen *Kreditzinssatz* für Kommunaldarlehen, welcher  $0 \% a^{-1}$  beträgt. Beim Rahmenparameter *Wasserverbrauch*

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

erfolgte die Eingrenzung der Rahmenparameterspannweite anhand der Ergebnisse des Zeitreihenmodells. Bezogen auf den Mittelwerten der Ergebnisse verändert sich der einwohnerspezifische *Wasserverbrauch* über den gesamten Prognosezeitraum von -0,8 % ( $\approx -1,0$  %) bis 2,0 %.

#### Definition der Rahmenparameterwerte für die Szenarien

Zur detaillierten Analyse der technischen und wirtschaftlichen Parameter erfolgte anhand der statistischen Auswertung der Langzeitreihen und Trendanalyse die Konzeption von drei Szenarien. Zusätzlich erfolgte eine Evaluierung bezogen auf die Festsetzung der Rahmenparameter für die Szenarien durch Rücksprache mit dem betrachteten Aufgabenträger. Die Rahmenparameterwerte für die einzelnen Szenarien sind in Tabelle 4-14 beschrieben.

**Tabelle 4-14:** Rahmenparametereinstellung für die Szenarien

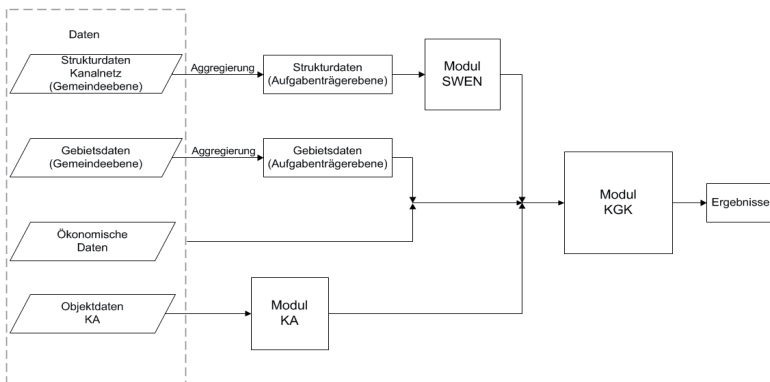
Rahmenparameter	Einheit	Szenario I (Positivszenario)	Szenario II (Realszenario)	Szenario III (Negativszenario)
Bevölkerung	(%)	0	-20,0	-30
Inflation	(%)	0,0	1,5	2,5
Personalkosten	(%)	0,0	1,5	2,5
Kreditzinssatz	(%)	0,0	2,0	4,0
Wasserverbrauch	(%)	10,0	0,0	-11,0
Gewerbe- und Industrie	(%)	0,0	0,0	0,0

Szenario I (Positivszenario) beschreibt die für den Aufgabenträger unter allen möglichen Voraussetzungen positivste Entwicklung der Rahmenbedingungen. Es wird angenommen, dass über den Prognosezeitraum die Entwicklung der *Bevölkerung* konstant, der *Kreditzinssatz* unverändert nahe Null, die *Inflation* entgegen den Erwartungen und Zielsetzung der Europäischen Zentralbank (EZB) ebenfalls im Mittel bei null bleiben. Gekoppelt an die *Inflation* bleiben die Personalkosten konstant. Es wird angenommen, dass der *Wasserverbrauch* der Haushalte über den Prognosezeitraum trotz der Weiterentwicklung von wassersparenden Geräten, ggf. getrieben durch ein verändertes Bewusstsein beim *Wasserverbrauch* oder einem erhöhten Verbrauch durch klimatische Veränderungen, um 10 % steigt. Die Annahmen in Szenario II (Realszenario) beschreiben die am wahrscheinlichsten über den Betrachtungszeitraum vorliegenden Rahmenparameterwerte. In diesem Szenario wird ein Rückgang der *Bevölkerung* von 20 % über den gesamten Zeitraum, ein *Kreditzinssatz* von 2 % a<sup>-1</sup>, eine jährliche *Inflation* und Personalkostensteigerung von 1,5 % a<sup>-1</sup> sowie ein unveränderter *Wasserverbrauch* der Haushalte angenommen. Für Szenario III (Negativszenario) werden in Anlehnung der am wahrscheinlichsten negativsten Ausprägungen, eine Reduktion der *Bevölkerung* über den gesamten Betrachtungszeitraum um -30 %, ein *Kreditzinssatz* von 4 % a<sup>-1</sup>, eine jährliche *Inflation* sowie Personalkostensteigerung von 2,5 % a<sup>-1</sup> und aufgrund demografischer Effekte, neuer Innovationen oder Entwässerungskonzepte eine Verringerung des *Wasserverbrauchs* über den gesamten Prognosezeitraum von -11 % angenommen. Die Entwicklung von *Gewerbe- und Industrie* bleibt in allen Szenarien unverändert.



#### 4.4 Modellaufbau

Die Programmierung des Modells erfolgte in der numerischen Rechenumgebung von MATLAB® (Version R2016b), einem kommerziellen Programm von MathWorks®. In Anlehnung an die gesplittete Abwassergebühr, welche in Schmutzwasser- und Niederschlagswassergebühr gegliedert ist, beinhaltet das Modell alle kostenrelevanten Assets und Tätigkeiten des Kerngeschäftes der Schmutzwasser-entwässerung und -behandlung eines typischen Aufgabenträgers der Abwasserwirtschaft in Deutschland. Das Basismodell besteht aus drei Modulen, Modul Schmutzwasserentsorgungsnetz (*SWEN*), Modul Kläranlage (*KA*) und Modul Kosten- und Gebührenkalkulation (*KGK*), anhand derer der Ist-Zustand analysiert und die zukünftige Entwicklung prognostiziert wird (Abbildung 4-20). Im Zuge von themenbezogenen Untersuchungen können schwerpunktbasierend Maßnahmen zur technischen und wirtschaftlichen Anpassung in Form von zusätzlichen Modulen entwickelt, implementiert und deren Effekte analysiert werden.



**Abbildung 4-20:** Schematische Darstellung des modularen Modellaufbaus

Die erhobenen Infrastruktur- und Gebietsdaten auf Gemeindeebene werden auf Aufgabenträgerebene aggregiert und von den Modulen *SWEN* und *KGK* importiert. Modul *KA* importiert die KA-Objektdaten, welche über die AGS den Gemeinden zugeordnet werden. Modul *SWEN* enthält einen vereinfachten globalansetzenden Asset-Bewertungsansatz (engl. Asset-Assessment), welcher das Alter und anhand von Alterungsfunktionen den Zustand des Kanalnetzes bestimmt. Über den Kanalnetz-zustand werden die Instandhaltungskosten ermittelt. Modul *KA* berechnet anhand einer CSB-Fraktionierung die Zulaufkonzentrationen, die Stoffströme in der Belebung und im Ablauf, sowie die damit verbundenen, in Abhängigkeit von der Verfahrenstechnik stehenden, Prozessgrößen. Zur Bestimmung von Reinvestitionszyklen und des Alters ist auch in diesem Modul ein vereinfachtes Asset-Assessment integriert. Basierend auf den kostenrelevanten prozessbasierten Parametern der Module *SWEN* und *KA* werden in Modul *KGK* die Kosten berechnet und den Kostenarten zugeordnet. Anlagen- und prozessunabhängige Kosten werden anhand der Rahmenparameter einwohner- oder mengen-spezifisch umgerechnet und in die Zukunft projiziert.



#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

verfahrensabhängige durchschnittliche Nutzungsdauer von 2 bis 15 Jahren haben (DWA 2012c). Als Maßnahmen werden Ausbesserungs-, Injektions- und Abdichtungsverfahren unterschieden. Unter Renovierung sind Maßnahmen definiert, welche zur Verbesserung der Funktionsfähigkeit eine vollständige oder teilweise Einbeziehung der ursprünglichen Kanalsubstanz einhalten. Bei der Renovierung wird unterschieden in Auskleidungs- (Rohrstrang-, Einzelstrang-, Close-Fit-, Wickelrohr-Schlauchlining-, Rohrliningverfahren) oder Beschichtungsverfahren (Verdrängungs-, Aufspritz-, Anschleuder-, Auspressverfahren). Die Nutzungsdauer dieser Maßnahmen beträgt gemäß DWA (2012c) zwischen 25 und 40 Jahren. Jedoch geben Hersteller sowie weitere Quellen in Abhängigkeit vom Verfahren Nutzungsdauern von bis zu 80 als auch 100 Jahren an (MKULNV 2014). Bei gravierenden baulichen Mängeln oder aus hydraulischen Gegebenheiten bei denen eine Renovierung zu keiner ausreichenden Verbesserung des Zustandes oder des Abflussgeschehens führt, findet eine Erneuerung dieser Kanäle oder Leitungen statt. Eine Erneuerung wird in offener, halboffener (halboffener Rohrvortrieb) oder geschlossener Bauweise (Rohrberst-, Pipe-Eating-Verfahren) durchgeführt (DWA-M-143-1 2004). Durch die Neuverlegung der Leitung wird eine Nutzungsdauer von 50 bis 100 Jahren zugesprochen (DWA 2012c, DWA-A-133 2005). Obwohl kostenseitige Unterschiede von ca. 50 bis 900 € m<sup>-1</sup> (MKULNV 2014) zwischen Erneuerungs- und Renovierungsmaßnahmen existieren, wurden in Anbetracht ähnlicher Nutzungsdauern und zur Simplifizierung der modellhaften Abstraktion beide Sanierungsformen zusammengefasst. Diesbezüglich sind für die Modellierung die spezifischen Kosten bezogen auf das Gesamtnetz entweder auf die repräsentativste Sanierungsform zu beziehen oder ein hergeleiteter Mittelwert anzuwenden.

Die Kanalnetzanteile für die jüngste AK (<10 a) ergibt sich für den Bezugszeitpunkt (t=0) nach (8) aus dem Kanalnetzanteil, welcher sich in der jeweiligen AK befindet. Im fortlaufenden Berechnungszeitraum (t=t<sub>i-1</sub>+1) wird dieser AK-Anteil um den Anteil erneuerter und renovierter sowie den Anteil neuer Leitungen durch Neuerschließungen ergänzt. Beide Einflussgrößen werden durch festzulegende jährliche Quoten (Sanierungsquote und Neuerschließungsquote) bestimmt, welche über den gesamten Betrachtungszeitraum unverändert bleiben und sich auf die Gesamtlänge des SWEN beziehen. In Abhängigkeit des Erreichens der Laufzeitvariablen (t) eines Dekadenwertes wird zur Ermittlung der Altersstruktur der Kanalnetzanteil bei t=10 zum Zeitpunkt t=0 und bei i > 10 zum Zeitpunkt t=t-10 (Restwert der vorherigen Dekadenverschiebung) in die nächste AK übergeben.

$$L_{AK(n=1)} = \begin{cases} L_{AK(n=1,t-1)} + \sum_{n=1}^6 L_{KanSanAK(n)} - L_{AK(n,i-9)} + r_{KanNeu} \cdot L_{Ges(t)} ; \\ \text{wenn } t - nint\left(\frac{t}{10}\right) \cdot 10 = 0 \\ L_{AK(n=1,t-1)} + \sum_{n=1}^6 L_{KanSanAK(n)} + r_{KanNeu} \cdot L_{Ges(t)} ; \text{ wenn } t - nint\left(\frac{t}{10}\right) \cdot 10 \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$L_{AK}$	Leitungslängen in Altersklassen	(km)
$L_{KanSanAK}$	Leitungslänge Erneuerung bzw. Sanierung AK	(km)
$r_{KanNeu}$	Neuerschließungsquote	(km)
$L_{Ges}$	Gesamtlänge SWEN	(km)
$nint$	Nearest Integer	(-)

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Für die AK zwischen >10 a und >50 a ergeben sich nach (9) zusätzliche Veränderungen bei den Kanalnetzanteilen nur durch die Erneuerung bzw. Renovierung von Kanälen. Wie bereits für die AK < 10 a beschrieben, findet bei den anderen AK ebenfalls eine Übergabe der Kanalnetzanteile in die nächste AK bei Erreichen der Laufzeitvariablen (t) eines Dekadenwertes statt.

$$L_{AK(1>n\leq 6)} = \begin{cases} L_{AK(1>n\leq 6,t-1)} + L_{KanSanAK(n)} - L_{(n,t-9)} & ; \text{ wenn } t - \text{nint}\left(\frac{t}{10}\right) \cdot 10 = 0 \\ L_{AK(1>n\leq 6,t-1)} + L_{KanSanAK(n)} & ; \text{ wenn } t - \text{nint}\left(\frac{t}{10}\right) \cdot 10 \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

Gemäß (10) werden die Kanalnetzanteile in den einzelnen AK, die erneuert bzw. renoviert werden, hergeleitet. Durch die Sanierungsquote sind die zu renovierenden und zu erneuernden Kanalkilometer vordefiniert. Ausgehend vom Kanalnetzanteil der ältesten AK (>50 a) werden die zu sanierenden Kanalkilometer abgezogen. Ist die zu sanierende Kanalnetzlänge größer als der Kanalnetzanteil in der ältesten AK, wird die Differenz (Rest) von der nächsten AK abgezogen. Dieses Prozedere wiederholt sich, bis sämtliche zu sanierenden Kanalkilometer im betreffenden Jahr verrechnet sind. Für den Rechenalgorithmus bedingt dies eine inverse Laufvariable ( $n_i$ ), um die Verrechnung der Kanalnetz-kilometer bei AK > 50 a beginnen zu lassen. Durch die umgekehrte Zählweise stimmt die Zuordnung zwischen  $L_{AK}$  und  $L_{KanSanAK}$  überein.

$$L_{KanSanAK(n_i,t)} = \begin{cases} L_{AK(n_i,i)} ; \\ \text{wenn } L_{AK(n_i,i)} \leq r_{KanSan} \cdot L_{Ges(i)} - \sum_{n_1}^6 L_{KanSanAK(n,i)} & \text{mit } n_i = n_{AK} - n_0^5 \\ r_{KanSan} \cdot L_{Ges(i)} - \sum_{n_1}^{n_i} L_{KanSanAK(n,i)} ; \\ \text{wenn } L_{AK(n_i,i)} > r_{KanSan} \cdot L_{Ges(i)} - \sum_{n_1}^6 L_{KanSanAK(n,i)} \end{cases} \quad (10)$$

$n_i$	Inverse Laufvariable (Zähler)	(-)
$n_{AK}$	Gesamtanzahl AK	(-)

Bedingt durch die beschriebene Berechnungsweise führt die Einordnung neugebauter sowie erneuerter bzw. renovierter Kanalnetzlängen in die jeweiligen Altersklassen zu einer ungenauen Zuordnung der Sanierungs- und Neuerschließungsanteile in die folgende AK.

#### Ermittlung des Kanalzustandes

Für die Bestimmung der Kanalnetzanteile in den Zustandsklassen wurde hinsichtlich der vorliegenden Daten und aus Gründen der einfachen Implementierung das Kohortenmodell von Herz (1996, 1995) ausgewählt. Besonders für die Gesamtbetrachtung von Entwässerungssystemen im Zusammenhang von Langzeitstrategien und zur Abstimmung des Budgetrahmens ist dies ein opportuner Ansatz (Kley und Caradot 2013, Ana und Bauwens 2010).

In Analogie zum Merkblatt DWA-M-149-3 (2015) gibt es in dieser Untersuchung bei der Integration des Kanalkohortenmodells nach Herz (1996, 1995) fünf ZK, in welchen sich die Kanalnetzanteile befinden können, wobei der beste Zustand keine Defekte oder Mängel aufweist als ZK 4 und der schlechteste Zustand mit vielen oder großen Schäden als ZK 0 definiert ist. Im Gegensatz zu den Übergängen zwischen den AK beim Kanalalter, findet die Simulation der Zustandsänderungen in Jahresschritten statt. Der Übergang von einem Zustand in den nächsten, wird anhand der

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Überlebensfunktion von Herz nach (11) ermittelt. Dabei werden mittels Kurvenscharen durch mehrere Zustandsübergangsfunktionen die Überlebensfunktionen gebildet. Die Zustandsübergangsfunktionen beschreiben als statistische Zufallsgröße die altersabhängige Wahrscheinlichkeit des Kanals, sich in einer der fünf ZK zu befinden.

$$R_{(n,i)} = \frac{A_{(n)} + 1}{A_{(n)} + e^{B_{(n)}(t_{Kan(i)} - C_{(n)})}} \quad (11)$$

R	Überlebensfunktion der Kohorten	(-)
A	Alterungsvektor	(-)
B	Ausfallvektor	(-)
C	Resistenzzeitvektor	(-)
$t_{Kan}$	Mittleres Alter SWEN	(-)

Der Anteil der Leitungen in einer Kohorte ergibt sich aus dem Alterungsvektor (A), welcher die Schnelligkeit des Alterns beschreibt, dem Ausfallvektor (B), welcher die Übergangsrate im hohen Alter repräsentiert und dem Resistenzzeitvektor (C), welcher das Alter, bis zu dem sich die Kanäle im festgelegten Mindestzustand befinden, definiert. Anhand dieser Vektoren können die Zustandsübergangsfunktionen kalibriert werden (Herz 2002, Herz 1996, 1995). Für die Kalibrierung bedarf es Informationen zum Errichtungsjahr sowie Kanalinspektionsdaten zum Zustand als repräsentative Stichprobe für jede Kohorte. Anhand dieser Daten werden die Vektoren mit der geringsten Abweichung zwischen den kalibrierten Übergangsfunktionen und den Inspektionsdaten ermittelt (Baur und Herz 2002). Da sich die Überlebensfunktion in diesem Modul auf das gesamte SWEN bezieht, wird für das durchschnittliche Kanalalter ( $t_{Kan}$ ) in Abhängigkeit von der vorliegenden Altersstruktur aus den Daten für jedes Simulationsjahr ein gewichteter harmonischer Mittelwert nach (12) gebildet.

$$t_{Kan(i)} = \frac{t_{Kan\theta(1)} \cdot L_{AK(1,i)} + \dots + t_{Kan\theta(n)} \cdot L_{AK(n,i)}}{L_{Ges(i)}} \quad (12)$$

Gemäß (13) resultieren die Kanalnetzanteile in den jeweiligen ZK aus dem Produkt der Übergangsfunktion und der Gesamtlänge des SWEN im betrachteten Jahr. Bei ZK 4 kommen die zusätzlichen Kanalnetzanteile durch Neuerschließungen und Kanalerneuerungen bzw. Sanierungen (in Analogie zum Kanalalter) hinzu. Und bei ZK 0 bis ZK 3 werden die, für die jeweilige ZK hergeleiteten, erneuerten bzw. sanierten Kanallängen abgezogen.

$$L_{ZK(n,i+1)} = \begin{cases} L_{ZK(n,i)} \cdot R_{(n,i)} + \sum_n^5 L_{KanSanZK(n,i)} - L_{KanSanZK(n,i)} + r_{KanNeu} \cdot L_{Ges(i)} & ; \text{wenn } n = 1 \\ L_{ZK(n,i)} \cdot R_{(n,i)} + L_{ZK(n-1,i)} - L_{ZK(n-1,i)} \cdot R_{(n-1,i)} - L_{KanSanZK(n,i)} & ; \text{wenn } 1 < n \leq 5 \end{cases} \quad (13)$$

$L_{KanSanZK}$                       Anteil Erneuerung bzw. Sanierung in der ZK                      (km)

Die Herleitung der erneuerten bzw. sanierten Kanallängen in den einzelnen ZK erfolgt nach (14) in Analogie der Berechnung für die AK. Demnach ist für (14) eine inverse Laufvariable ( $n_i$ ) gefordert, um die Verrechnung der Kanalnetzkilometer bei ZK 0 beginnen zu lassen.

$$L_{\text{KanSanZK}(n_i,i)} = \begin{cases} L_{\text{ZK}(n_i,i)} ; \text{ wenn } L_{\text{ZK}(n_i,i)} \leq r_{\text{KanSan}} \cdot L_{\text{Ges}(i)} - \sum_{n_i}^5 L_{\text{KanSanZK}(n_i,i)} \\ r_{\text{KanSan}} \cdot L_{\text{Ges}(i)} - \sum_{n_i}^5 L_{\text{KanSanZK}(n_i,i)} ; \\ \text{wenn } L_{\text{ZK}(n_i,i)} > r_{\text{KanSan}} \cdot L_{\text{Ges}(i)} - \sum_{n_i}^5 L_{\text{KanSanZK}(n_i,i)} \end{cases} \quad (14)$$

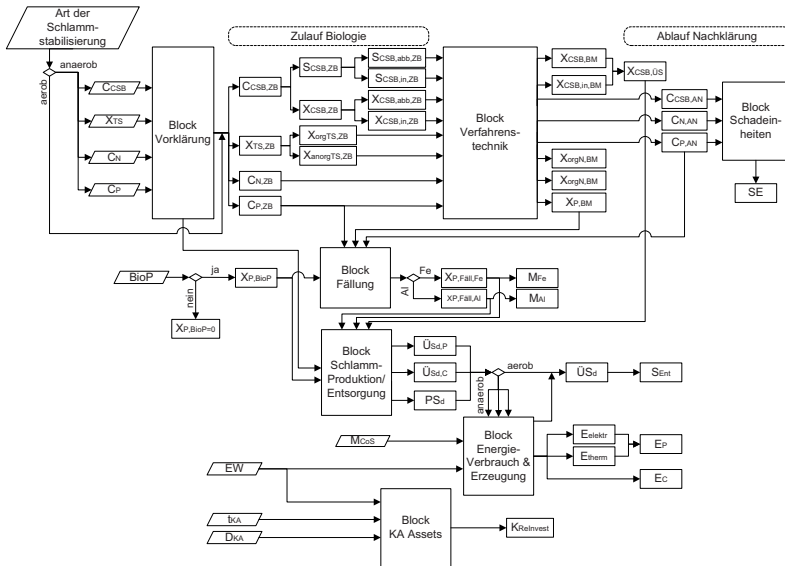
In Abhängigkeit vom Kanalzustand (ZK0 bis ZK2) wird über die Kanallängen im Modul *KGK* der Aufwand für die Kanalreparaturen ermittelt. Die Kanalreparaturen werden modellseitig nicht den Investitionen zugeordnet, sondern den direkt gebührenwirksamen Kosten.

#### 4.4.2 Modul KA

Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Objektdaten vom LUNG wurde für die Simulation der prozessbasierten KA-Parameter ein numerisches Stofffrachtenmodell basierend auf der Bemessungsrichtlinie DWA-A-131 (2016) für einstufige Belebungsanlagen integriert. Anhand von Sicherheitsfaktoren (SF) und stationären Annahmen für den Betrieb erfolgt die Berechnung der wesentlichen Bemessungsparameter: Verweilzeit der Feststoffe, Schwebstoffkonzentration und die resultierende Überschussschlammproduktion. Diese Parameter stehen in Abhängigkeit der Abwassermatrix im Zulauf der KA sowie den Wachstums- und Sterberaten der heterotrophen und autotrophen Mikroorganismen (Walder et al. 2013, Tchobanoglous et al. 2013). Zur Bestimmung der Schlammproduktion anderer integrierter Verfahrenstechniken werden die jeweiligen Bemessungsrichtlinien der DWA herangezogen. Für die Rotationstauchkörper (RTK) findet die Berechnung in Anlehnung an ATV-DVWK-A281 (2001) und für Teichkläranlagen (TKA) nach DWA-A-201 (2005) mit vereinfachten Ansätzen statt. Basierend auf den Stofffrachten werden die Schadeinheiten zur Bestimmung der Abwasserabgabe gemäß AbwAG ermittelt. Für Anlagen mit anaerober Stabilisierung und Faulgas-erzeugung erfolgt die Herleitung des Gasertrags gemäß Gretzschel et al. (2012). Die Ermittlung des Gesamtbedarfs an elektrischer Energie für die KA findet anhand einwohnerspezifischer Werte der DWA (2012a) statt. Das Asset-Assessment erfolgt über die Fortschreibung des KA-Alters und der anlagenspezifischen Herleitung der Reinvestitionskosten über Kostenfunktionen von Horstmeyer et al. (2014) und Halbach (2003).

Eine vereinfachte und zusammenfassende schematische Darstellung über den Aufbau des Moduls sowie der Rechenalgorithmen bietet Abbildung 4-22.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells



**Abbildung 4-22:** Schematische Darstellung der Berechnungsabläufe des Moduls KA

Basierend auf den Bemessungsrichtlinien findet im Modul KA über die Reinigungsleistung der Verfahrenstechniken die Ermittlung der Stoffkonzentrationen im Ablauf und der Schlammmengen statt. Die Reinigungsleistung der biologischen Verfahrenstechniken steht in Abhängigkeit zur Abwassertemperatur, welche für das gemäßigte Klima (Geltungsbereich von 8 - 20°C) ausgelegt ist und die Biomasseaktivität sowie weitere physio-chemische Parameter beeinflusst (Walder et al. 2013, ATV-DVWK-A281 2001; Sedory und Stenstrom 1995). Zwischen Zu- und Ablauf der KA erfolgt anhand von Sedimentations-, Ab- und Umbauprozessen die Reduktion der Stofffrachten.

Im Folgenden werden nur die Parameter aus dem Modul KA hergeleitet, welche für das anschließende Verständnis des Rechenalgorithmus erforderlich sind. Alle weiteren Kenngrößen und Parameter sowie Standardeinstellungen sind den jeweiligen Bemessungsrichtlinien zu entnehmen.

#### Konzentrationen im Zulauf zur Kläranlage

Basierend auf den definierten Rahmenbedingungen: Bevölkerungsentwicklung, häuslicher Wasserverbrauch und Gewerbe- und Industrieanteil werden nach (15) die Konzentrationen der KA-Zulaufparameter bestimmt. Hierfür wird aus den Objektdaten die spezifische Fracht je Einwohner (E) sowie der Einwohnergleichwert (EGW) für Gewerbe und Industrie ermittelt. Die EGW bleiben über den Prognosezeitraum, hinsichtlich schwer zu prognostizierenden zukünftigen Veränderungen, unverändert.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

$$C_{X,ZV(n,t)} = \frac{B_{X,E,ZV} \cdot N_{E(n,t)} \cdot Q_{d,E(n,t)} + B_{X,EGW,ZV} \cdot N_{EGW(n,t)} \cdot Q_{d,EGW(n,t)}}{Q_{d,E(n,t)} + Q_{d,EGW(n,t)}} \quad (15)$$

$C_{X,ZV}$	Stoffkonzentration Zulauf VK	(mg l <sup>-1</sup> )
$B_{X,E,ZV}$	E-spezif. Stofffracht Zulauf VK	(kg d <sup>-1</sup> E <sup>-1</sup> )
$B_{X,EGW,ZV}$	EGW-spezif. Stofffracht Zulauf VK	(kg d <sup>-1</sup> EGW <sup>-1</sup> )
$N_E$	Anzahl Einwohner	(E)
$N_{EGW}$	Anzahl Einwohnerequivalente	(EGW)
$Q_{d,E}$	Abwassermenge Haushalte	(m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )
$Q_{d,EGW}$	Abwassermenge Gewerbe und Industrie	(m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )

Mittels der Rahmenparameter  $RP_{Bev}$ , und  $RP_{WV}$  wird die durchschnittliche jährliche Änderungsrate für die Bevölkerung sowie der Wasserverbrauch der Haushalte berechnet. Durch die jährlichen Änderungsraten erfolgt die Bestimmung der jährlichen Einwohnerzahl nach (16) sowie die Schmutzwassermenge der Haushalte nach (17).

$$N_{E(n,t)} = N_{E(n-1,t)} + \Delta N_{E,Bev} \quad (16) \quad Q_{d,E(n,t)} = Q_{d,E(n-1,t)} + \Delta Q_{WV,E} \quad (17)$$

$\Delta N_{E,Bev}$	Veränderung Bevölkerungszahl	(E)
$\Delta Q_{WV,E}$	Häusliche Wasserverbrauchsveränderung	(m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )

Die Beeinflussung durch Gewerbe und Industrie wird nur über den Rahmenparameter  $RP_{GI}$  berechnet. Aus dessen abgeleiteter jährlicher Änderungsrate berechnet sich die Indirekteinleiterzahl nach (18) und darauf bezogen die gewerbliche und industrielle Schmutzwassermenge nach (19).

$$N_{EGW(n,t)} = N_{IG(n,t)} + \Delta N_{EGW,IG} \quad (18) \quad Q_{d,EGW(n,t)} = Q_{d,EGW(t,n-1)} + \Delta Q_{IG} \quad (19)$$

$\Delta N_{EGW,IG}$	Veränderung Gewerbe und Industrie	(EGW)
$\Delta Q_{IG}$	Wasserverbrauchsveränderung Gewerbe und Industrie	(m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )

#### Phosphat-Fällung

Neben dem P-Rückhalt in der VK (10 % bis 5 %), dem P-Einbau in die Biomasse (nach ATV-DVWK 2003 bis zu maximal 47 % bei Verhinderung der P-Rücklösung und Entnahme des nachwachsenden Schlammes aus dem System) und der biologischen vermehrten P-Elimination (Bio-P mit einer maximalen P-Elimination von 85 % in Abhängigkeit vom Schlammalter) ist als konventionelles Verfahren die chemische P-Elimination zu nennen. Bei dieser Art der P-Elimination werden anhand von Fällmitteln gelöste Phosphate im Klärschlamm gebunden. Anwendung findet dieses Verfahren in Form der Vorfällung, bei der die Zugabe des Fällmittels vor der biologischen Stufe (üblicherweise vor der VK) erfolgt, der Simultanfällung mit der Dosierung in die biologische Stufe oder im Zulauf zur NK oder der Nachfällung, bei welcher die Fällmittel in einer separaten, nachgeschalteten Verfahrensstufe zur Partikelabscheidung dazugegeben werden.

Nach DWA-A-202 (2011) lässt sich der durchschnittliche Fällmittelbedarf mit 1,5 mol Me<sup>3+</sup> pro mol zu fällendes Phosphat ermitteln. Daraus ergeben sich umgerechnet nach (20) der Fe- und nach (21) der Al-Fällmittelbedarf.



#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

$$X_{P,Fall,Fe} = X_{P,Fall} \cdot 2,7 \quad (20) \quad X_{P,Fall,Al} = X_{P,Fall} \cdot 1,3 \quad (21)$$

$$\frac{X_{P,Fall,X}}{X_{P,Fall}} \quad \begin{array}{l} \text{Fällmittelmenge} \\ \text{Zu fällendes Phosphat} \end{array} \quad \begin{array}{l} (\text{mg l}^{-1}) \\ (\text{mg l}^{-1}) \end{array}$$

Die zu fällende Phosphatkonzentration ergibt sich gemäß (22) aus der Differenz der Gesamtphosphatkonzentration im Zulauf zur Belebung abzüglich des Schwellenwerts, des in der Biomasse eingebauten P und des reduzierten P durch die Bio-P-Elimination.

$$X_{P,Fall} = C_{P,ZB} - C_{P,AN} - X_{P,BM} - X_{P,BioP} \quad (22)$$

$$\begin{array}{lll} C_{P,ZB} & \text{P-Zulaufkonzentration Belebung} & (\text{mg l}^{-1}) \\ C_{P,AN} & \text{P-Schwellen- oder Ablaufkonzentration} & (\text{mg l}^{-1}) \\ X_{P,BM} & \text{P eingebaut in Biomasse} & (\text{mg l}^{-1}) \end{array}$$

#### Schlammproduktion

Als Abfall- bzw. Restprodukt der Abwasserbehandlung bleibt, neben den Störstoffen und Abfällen in der Sieb- bzw. Rechenanlage, welche im Modell als konstant angesehen und nicht weiter betrachtet werden, der Klärschlamm übrig. Dieser wird in Primär-, Sekundär- und Tertiärschlamm unterteilt. Der Primärschlamm fällt in der mechanischen Reinigungsstufe bzw. VK an. In der biologischen Stufe wird über die Nachklärung der Sekundärschlamm (auch Überschussschlamm genannt), welcher durch mikrobiellen Zuwachs entsteht, separiert. Als Tertiärschlamm wird der in der weitergehenden Abwasserreinigung (dritte Reinigungsstufe) anfallende Schlamm bezeichnet. Hierzu zählen auch die durch chemische Fällung oder Flockung anfallenden Schlämme, wie z.B. bei der Phosphatfällung (P-Elimination). Oft findet diese als Vor- oder Simultanfällung statt, weshalb der Tertiärschlamm dann nicht getrennt anfällt, sondern im Primär- oder Sekundärschlamm enthalten ist. Nur bei einer baulichen Trennung der zusätzlichen Behandlungsanlage, in Form der Nachfällung, liegt der Tertiärschlamm separiert vor. Hinsichtlich der begrenzten Informationen über die Anlagentechnik der zur Verfügung stehenden Daten vom LUNG, wird im Modul KA in Bezug zur Art der Schlammbehandlung (aerob, anaerob) die Gesamtklärschlammmenge nach (23) in Primär- und Sekundärschlamm (inkl. Schlamm der chemischen P-Elimination) differenziert. Da die Fracht an abfiltrierbaren Stoffen im Ablauf der NK zu vernachlässigen ist, wird die Schlammproduktion dem Überschussschlamm anfall gleichgesetzt (DWA-A-131 2016).

$$M_{S,Ges,d} = \begin{cases} \ddot{U}_d + S_{VK} ; & \text{wenn SS = anaerob} \\ \ddot{U}_d & ; \text{wenn SS = aerob} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{array}{lll} M_{S,Ges,d} & \text{Gesamtschlammmenge} & (\text{kg TS d}^{-1}) \\ M_{S,VK} & \text{Schlamm anfall VK (Primärschlamm)} & (\text{kg TS d}^{-1}) \\ \ddot{U}_d & \text{Schlammproduktion Biologie (Sekundärschlamm)} & (\text{kg TS d}^{-1}) \\ SS & \text{Art der Schlammstabilisierung} & (-) \end{array}$$

Die Primärschlammmenge in der VK wird durch die Abscheideleistung, welche sich aus Durchflusszeit und der damit verbundenen Sedimentationsgeschwindigkeit der Partikel ergibt, beeinflusst. Für

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

bestimmte Verfahrenstechniken ist ein unterschiedlicher Partikelrückhalt erforderlich, dies ist bezogen auf den partikulären CSB bei der Berechnung der Primärschlammmenge in (24) berücksichtigt.

$$M_{S,VK} = \begin{cases} X_{TS,ZV} \cdot \eta_{VK} \cdot Q_d / 1000 & ; \text{wenn SS} = \text{anaerob} \\ 0 & ; \text{wenn SS} = \text{aerob} \end{cases} \quad (24)$$

$X_{TS,ZV}$       Konzentration TS Zulauf VK      (mg l<sup>-1</sup>)  
 $\eta_{VK}$       Abscheideleistung der VK      (-)

Durch die Partikelabscheidung werden neben dem CSB auch die anderen betrachteten Stofffrachten in der VK reduziert. Die Standardeinstellungen der Abscheideleistungen für die jeweiligen Stofffrachten sind in Tabelle 4-15 enthalten. Bei detaillierteren Informationen über die Anlagentechnik oder für die Kalibrierung, können diese Wirkungsgrade der VK angepasst werden. Für die Belebungsverfahren (BB) wurden die Abscheideleistungen der mittleren Durchflusszeit von 1,5 - 2 Stunden und für die Rotations-/Scheibentauchkörper (RTK), TKA und PKA mit einer Durchflusszeit >2,5 Stunden, angenommen. Bei den letzteren Verfahrenstechniken ist gemäß den Bemessungsrichtlinien, der Zulauf zu den Verfahrensstufen möglichst von Störstoffen freizuhalten, weshalb die Rückhaltung bei diesen Anlagen höher ausfällt (DWA-A-201 2005, ATV-DVWK-A281 2001; DWA-A-262 2006).

**Tabelle 4-15:** Abscheideleistung der VK nach DWA-A-201 (2005), DWA-A-262 (2006) und ATV-DVWK-A281 (2001)

$\eta$ (%)	BB <sub>anaerob</sub>	$\frac{BB_{anaerob} + SBR}{GK \leq 3 \quad GK > 3}$		RTK	TKA	PKA
C <sub>CSB</sub>	0	0,40	0,35		0,40	
X <sub>CSB</sub>		0,60	0,55		0,60	
X <sub>TS</sub>		0,65	0,60		0,65	
C <sub>KN</sub>		10				
C <sub>P</sub>		10				

Anhand der Abscheideleistung der VK werden die Zulaufkonzentrationen für die biologische Stufe bestimmt. In der biologischen Stufe fällt der Sekundärschlamm an, welcher sich nach (25) aus der Schlammproduktion der Kohlenstoff- und der Phosphorelimination zusammensetzt.

$$\dot{U}S_d = \dot{U}S_{d,C} + \dot{U}S_{d,P} \quad (25)$$

$\dot{U}S_{d,C}$       Schlammproduktion Kohlenstoffelimination      (kg)  
 $\dot{U}S_{d,P}$       Schlammproduktion Phosphorelimination      (kg)

Die Kohlenstoffelimination und der dadurch anfallende Schlamm sind der biologischen Stufe der KA zuzuordnen. In Abhängigkeit der Verfahrensort finden dort nitrifizierende und denitrifizierende Prozesse statt. Bei der Nitrifizierung findet eine zweistufige Oxidation von Ammonium über Nitrit zu Nitrat statt. Dies wird durch das Vorhandensein von autotrophen Bakterien (Nitrosomonas und Nitrobakter) ermöglicht, welche die Reaktionsprozesse als Energiequelle und Reduktionsäquivalente zur Assimilation von Kohlenstoffdioxid nutzen. Die Wachstumsrate dieser Nitrifikanten wird beeinflusst durch Abwasserinhaltsstoffe, Temperatur und pH-Wert. Kurzfristige Schwankungen dieser

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Parameter werden bei der Ermittlung des aeroben Bemessungsschlammalters in der Bemessungsrichtlinie durch den Prozessfaktor und dem Stoßfaktor, welcher die Schwankungen der Stickstofffracht im Zulauf zur Belebung einbezieht, berücksichtigt. Bei der Denitrifikation erfolgt mittels heterotropher Bakterien in Abwesenheit von Sauerstoff (anaerober Prozess) und unter Abbau von organischen Substanzen (Elektronendonator) die biochemische Reduktion von Nitrat (Elektronenakzeptor) zu elementarem Stickstoff. In der Bemessungsrichtlinie für einstufige Belebungsanlagen geht der benötigte Anteil am Beckenvolumen für die Denitrifikation über das Verhältnis zum Anteil für die Nitrifikation zur Bestimmung des Bemessungsschlammalters ein (Mahro 2006, Hartmann 1993). Die partielle natürliche Denitrifikation, welche begrenzt unter anaeroben Bedingungen in TKA und PKA auftritt (Mayo und Abbas 2014, Battistoni et al. 2007, Bigambo und Mayo 2005, Munch et al. 2005, Weisner et al. 1994), wird aufgrund des geringen Umsatzes nicht berücksichtigt.

Der Überschussschlammanteil aus der Kohlenstoffelimination ergibt sich aus dem in der Belebung in Form von Schlamm gebildeten CSB, welcher sich aus dem inerten partikulären CSB im Zulauf zur Belebung der gebildeten Biomasse und den vom endogenen Zerfall der Biomasse verbliebenen inerten Feststoffen zusammensetzt und dem partikulären mineralischen Anteil der Trockensubstanz (TS) aus der Zulauffracht zur Belebung. Bei den Verfahrenstechniken der BB und SBR erfolgt die Berechnung gemäß (26) über die Annahme, dass sich aus dem Verhältnis von 1,6 g CSB je g oTS sich die organischen Feststoffe ergeben. Der partikuläre, inerte CSB des Zulaufs wird mit 1,33 g CSB je g oTS berechnet. Für die Abschätzung der gebildeten Biomasse werden 1,42 g CSB je g oTS angesetzt. Die als Überschussschlamm gebildeten Feststoffe sind bis zu 92 % organisch (DWA-A-131 2016). Für die Überschussschlammproduktion bei den RTK-Anlagen wird in der ATV-DVWK-A281 (2001) 0,75 kg TS pro kg abgebauten BSB<sub>5</sub> angegeben, diese Angabe wurde für die Berechnung ins Verhältnis zum CSB gesetzt und mit 0,375 kg TS pro kg abgebauten CSB übertragen. Aufgrund der hohen Abscheidewirkung der VK durch die vorgeschalteten Absetzteiche und die biologischen Prozesse in den Abwasserteichen fallen nur geringe Schlamm mengen an, weshalb diese vernachlässigt werden.

$$\ddot{U}_{d,c} = \begin{cases} Q_d \cdot \left( \frac{X_{CSB,inert,ZB}}{1,33} + \frac{X_{CSB,BM} + X_{CSB,inert,BM}}{0,92 \cdot 1,42} + X_{anorgTS,ZB} \right) / 1000 ; & \text{wenn VT = BB \vee SBR} \\ Q_d \cdot (0,375 \cdot X_{CSB,\ddot{U}S} + X_{anorgTS,ZB}) / 1000 ; & \text{wenn VT = RTK} \\ 0 ; & \text{wenn VT = TKA}_u \vee \text{TKA}_b \vee \text{PKA} \end{cases} \quad (26)$$

$X_{CSB,BM}$	Konzentration des CSB der Biomasse	(mg l <sup>-1</sup> )
$X_{CSB,inert,BM}$	Konzentration des inerten Anteils des CSB der Biomasse	(mg l <sup>-1</sup> )
$X_{CSB,inert,ZB}$	Konzentration des inerten Anteils des CSB im Zulauf	(mg l <sup>-1</sup> )
$X_{CSB,\ddot{U}S}$	Konzentration partikulärer CSB im Überschussschlamm	(mg l <sup>-1</sup> )
$X_{anorgTS,ZB}$	Konzentration abfiltrierbarer anorganischer TS Zulauf Belebung	(mg l <sup>-1</sup> )
VT	Verfahrenstechnik	(-)
BB	Konventionelle KA mit Belebungsbecken	(-)
SBR	Sequencing Batch Reaktor	(-)
RTK	Rotations- und Scheibentauchkörper	(-)
TKA <sub>u</sub>	Teichkläranlage (unbelüftet)	(-)
TKA <sub>b</sub>	Teichkläranlage (belüftet)	(-)
PKA	Pflanzenkläranlage	(-)

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Die Schlammmenge der P-Elimination setzt sich aus den Feststoffen der biologischen und der chemischen Phosphatreduktion nach (27) zusammen. Im Zuge der biologischen P-Elimination ist nach DWA A-202 mit einem Feststoffanfall von 3 kg TS je eliminiertem kg P zu rechnen. Bei der chemischen P-Fällung wird, abhängig vom Fällmittel für die resultierende Feststofffracht, für Eisen-Fällmittel eine TS-Fracht von 2,5 kg TS pro kg Fe und für Aluminium-Fällmittel eine TS-Fracht von 4 kg TS pro kg Al angenommen.

$$\dot{U}_{S,d,P} = Q_{d,Konz} \cdot (3 \cdot X_{P,BioP} + 2,5 \cdot X_{P,Fäll,Fe} + 4 \cdot X_{P,Fäll,Al}) / 1000 \quad (27)$$

$X_{P,BioP}$	Bio-P biologisch gebundener Phosphor	(mg l <sup>-1</sup> )
$X_{P,Fäll,Fe}$	Fällmittelbedarf Fe	(mg l <sup>-1</sup> )
$X_{P,Fäll,Al}$	Fällmittelbedarf Al	(mg l <sup>-1</sup> )

#### Energieerzeugung

Auf der Grundlage der ermittelten Schlamm- und angegebenen Co-Substratmengen erfolgt die Berechnung des Gasertrages gemäß (28).

$$V_{Gas,Ges} = V_{Gas,RS} + V_{Gas,CS} \quad (28)$$

$V_{Gas,Ges}$	Gasertrag gesamt	(N m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )
$V_{Gas,RS}$	Gasertrag Rohschlamm	(N m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )
$V_{Gas,CS}$	Gasertrag Co-Substrat	(N m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )

Durch Hydrolyse, Versäuerung, Acetogenese und Methanogenese werden die organischen Bestandteile in Faulgas umgewandelt. Das erzeugte Gas besteht durchschnittlich aus 65 % Methan, 34 % Kohlendioxid und 1 % Schwefelwasserstoff. Die Berechnung des Faulgasertrages aus dem Rohschlamm erfolgt nach (29). Mit einem Heizwert von 9.97 kWh m<sup>-3</sup> bei einem Methananteil von 100 % resultiert aus dem Methananteil des Klärgases ein Energiegehalt von 6,5 kWh m<sup>-3</sup>. Über den anaeroben Abbau kann je nach Zusammensetzung des Rohschlammes (Primär- und Sekundärschlamm) ein spezifischer Faulgasanfall zwischen 400 bis 500 l CH<sub>4</sub> kg oTS<sup>-1</sup> resultieren. Der spezifische Faulgasanfall für Co-Substrate schwankt in Abhängigkeit der enthaltenen Substanzen stark. Als Durchschnittswert kann für Co-Substrate und Nassschlämme anderer KA eine Mindestgasproduktion von 250 l CH<sub>4</sub> kg oTS<sup>-1</sup> angenommen werden. Die Berechnung des Gasertrags für Co-Substrate erfolgt in Analogie zum Rohschlamm (Frey 2012, Gretzschel et al. 2012, DWA-M-363 2010, Schreff 2010, DWA-M-380 2009).

$$V_{Gas} = H_{\eta CH_4} \cdot V_{Gas,spez} \cdot M_{oTS} \quad (29)$$

$H_{\eta CH_4}$	Heizwert in Abhängigkeit vom Methangehalt	(kWh m <sup>-3</sup> )
$V_{Gas,spez}$	Spezifischer Faulgasanfall	(l kg oTS <sup>-1</sup> )
$M_{oTS}$	Masse Organischer TS	(kg oTS d <sup>-1</sup> )

Die Ermittlung der organischen Rohschlammmenge erfolgt nach (30) und ergibt sich aus dem organischen Anteil des Primärschlammes und dem des Sekundärschlammes, weshalb bei beiden Schlammern der mineralische Anteil abgezogen wird.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

$$M_{oTS,RS} = (p_{VK,oTS} \cdot M_{s,VK} + \dot{U}_{Sd,C} - X_{anorgTS,ZB} \cdot Q_d/1000)/1000 \quad (30)$$

$M_{oTS,RS}$	Masse organischer TS Rohschlamm	(kg oTS d <sup>-1</sup> )
$M_{s,VK}$	Schlammfall VK (Primärschlamm)	(kg TS d <sup>-1</sup> )
$p_{VK,oTS}$	Anteil organischer TS VK	(-)

Über den Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerks (BHKW) lässt sich nach (31) das elektrische und nach (32) das thermische Energiepotential anhand des Gasertrages berechnen. Der elektrische Gesamtwirkungsgrad eines gut ausgelasteten BHKW kann zwischen 32% und 35 %, der thermische Gesamtwirkungsgrad mit 55 % angenommen werden (Gretzschel et al. 2012, Schreff 2010)

$$E_{el,E(n,t)} = \eta_{BHKW,el} \cdot V_{Gas,Ges(n,t)} \quad (31) \quad E_{th,E(n,t)} = \eta_{BHKW,th} \cdot V_{Gas,Ges(n,t)} \quad (32)$$

$E_{el,E}$	Elektrisches Energieerzeugungspotential	(kWh d <sup>-1</sup> )
$E_{th,E}$	Thermisches Energieerzeugungspotential	(kWh d <sup>-1</sup> )
$\eta_{BHKW,el}$	Elektrischer Gesamtwirkungsgrad BHKW	(-)
$\eta_{BHKW,th}$	Thermische Gesamtwirkungsgrad BHKW	(-)

Beim Betrieb einer Faulungsanlage kann es zu erheblichen Rückbelastungen aus der Schlammbehandlung für die biologische Reinigungsstufe kommen. Durch die anaeroben Abbauprozesse werden Stoffe, welche zuvor in den Belebtschlamm eingebaut wurden, wieder in Lösung freigesetzt. Dabei ist durch die Eindickung und Entwässerung des Faulschlammes die Stickstofffracht am bedeutendsten, diese liegt bei ca. 10 % bis 30 % des Stickstoffs im Zulauf. Die Rücklaufkonzentration des CSB hat nur eine geringe Bedeutung, da der CSB zum Großteil inert ist und nur ca. 10 % der Ablaufkonzentration entspricht. Auch die Phosphor-Rückbelastung ist bei der chemischen P-Elimination zu vernachlässigen. Bei einer Bio-P-Elimination erfolgt eine Rücklösung des eingebundenen Phosphors. Dieses freigesetzte P wird während des Prozesses erneut durch chemisch-physikalische Mechanismen (Adsorption und Fällung) zum Teil wieder gebunden und beträgt bezogen auf die Rohabwasserfracht weniger als 5 % (DWA-A-131 2016, Gretzschel et al. 2012, DWA-M-381 2007, DWA-M-366 2000).

#### Schlammmentsorgung

Durch anaerobe Faulung und den damit verbundenen Abbau der organischen TS wird der Schlamm hinreichend stabilisiert und das Volumen reduziert. Zudem verbessert sich die Entwässerbarkeit. In der Summe verringert sich demnach die Entsorgungsmenge, welche sich in Abhängigkeit vom Abbau der organischen TS und dem durch die Entwässerung erreichten TS-Gehalt nach (33) ermittelt wird.

$$V_{KS,Ent} = \begin{cases} \frac{M_{s,VK}}{TS_{Ent,PS}} + \frac{\dot{U}_{Sd,C}}{TS_{Ent,ÜS}} + \dot{U}_{Sd,P} & ; \text{wenn SS} = \text{anaerob} \wedge \neg \exists(SF) \\ \frac{(1 - \eta_{SR,PS}) \cdot M_{s,VK}}{TS_{Ent,PS}} + \frac{(1 - \eta_{SR,ÜS}) \cdot \dot{U}_{Sd,C}}{TS_{Ent,ÜS}} + \dot{U}_{Sd,P} & ; \text{wenn SS} = \text{anaerob} \wedge \exists(SF) \\ \frac{\dot{U}_{Sd,C}}{TS_{Ent,ÜS}} + \dot{U}_{Sd,P} & ; \text{wenn SS} = \text{aerob} \end{cases} \quad (33)$$

$V_{KS,Ent}$	Schlammmentsorgungsmenge	(m <sup>3</sup> )
$TS_{Ent,PS}$	TS-Gehalt entwässerter Primärschlamm	(%)

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

$TS_{Ent,ÜS}$	TS-Gehalt entwässerter Überschussschlamm	(%)
$\eta_{SR,PS}$	Schlammreduktion oTS-Abbau Primärschlamm	(-)
$\eta_{SR,ÜS}$	Schlammreduktion oTS-Abbau Überschussschlamm	(-)
SF	Schlammfäulung	(-)

Im Hinblick des organischen Feststoffabbaus im Primärschlamm von 57 % bis 70% und im Überschussschlamm von 35 % bis 38 %, beträgt der Feststoffabbau bezogen auf die gesamten Partikel (mineralisch und organisch) beim Primärschlamm zwischen 33 % und 50 %, beim Überschussschlamm von 25 % bis 33 %. Bezogen auf die Zusammensetzung des Rohschlammes von ca. 60 % Primärschlamm und 40 % Überschussschlamm resultiert ein Feststoffabbau für den Rohschlamm von 30 % bis 35 % (DWA-M-368 2014, MLUV M-V 2013, Gretzschel et al. 2012, Denkert 2007). Als Standardeinstellung ist der Feststoffabbau im Primärschlamm mit 43 % und für den Überschussschlamm mit 33 % festgelegt. Die Entwässerbarkeit der Schlämme ist abhängig vom Entwässerungsverfahren sowie dem Einsatz von Polymeren und Konditionierungsmitteln. In Tabelle 4-16 ist die nach DWA-M-366 (2000) zusammengefasste Spanne des zu erreichenden TS-Gehalts je Schlammart aufgeführt.

**Tabelle 4-16:** Durch Entwässerung erreichbare TS-Gehalte von Schlämmen nach DWA-M-366 (2000)

Schlammart	Entwässerbarkeit
	TS (%)
Primärschlamm	[30;45]
Sekundärschlamm	[18;25]
Mischschlamm	[24;45]
Aerob stabilisierter	[18;35]
Faulschlamm	[20;40]

Basierend auf den Angaben der DWA-M-366 (2000) sind für die Berechnung der zu entsorgenden Schlammengen folgende in Tabelle 4-17 enthaltenen TS-Gehalte als Standardeinstellungen für die jeweiligen Schlammarten festgelegt.

**Tabelle 4-17:** Standardeinstellungen des TS-Gehaltes für die Berechnung der Entsorgungsmengen des anfallenden Schlammes

TS-Art	anaerob $\wedge$ $\neg\exists(SF)$	anaerob $\wedge$ $\exists(SF)$	aerob
$TS_{Ent,PS}$ (%)	36	32	-
$TS_{Ent,ÜS}$ (%)	22	18	27

Zur Ermittlung der Schlammmentsorgungskosten für das gesamte Entsorgungsgebiet besteht im Modell die Option zur detaillierten Aufschlüsselung der Entsorgungskosten, in dem in Abhängigkeit von der vorhandenen Schlammmentsorgungsstrategie und Verfahrenstechnik zur Schlammbehandlung (Eindicker, maschinelle Entwässerung) die Kosten für Transport und nach Art der Entsorgung (landwirtschaftlich oder thermisch) separiert werden. Insbesondere bei fragmentierten ländlichen Strukturen mit überwiegend kleineren GK (1-2) und einem großen Entsorgungsgebiet hat der Transport von Nassschlämmen zu den zentralen Schlammbehandlungsanlagen einen Einfluss auf die Kosten der Schlammbehandlung. Die Berechnung der Transportkosten erfolgt optional über einen pauschalen Tonnenpreis oder anhand eines Tonnenkilometerpreises, welcher sowohl die Masse als auch die

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Strecke berücksichtigt. Basierend auf den Standortkoordinaten (Hochwert und Rechtswert in UTM) der KA in den Objektdaten, findet die Entfernungsberechnung zwischen den KA-Standorten zur Herleitung der Transportwege statt. Anhand des TS-Gehaltes wird die Schlammmasse hergeleitet. Durch Eindickung oder Zugabe von Polymeren lässt sich der TS-Gehalt erhöhen. In Tabelle 4-18 sind die TS-Gehalte der Nassschlämme (nicht entwässerter Rohschlamm) für die einzelnen Schlammarten aus unterschiedlichen Literaturquellen dargestellt.

**Tabelle 4-18:** TS-Gehalte von KA-Schlämmen mit und ohne Behandlung

Primär		Sekundär		Rohschlamm			Quelle
u	e	u	p	u	p	e	
1-6 (3)	6-12 (10)	0,4-1,2 (0,8)	3-6 (5)				Tchobanoglous et al. (2013)
2,5	5	0,7			4		Imhoff und Imhoff (2007)
				2-4	4-6		Appels et al. (2008)
<6		0,4-4	5-8				Schuster (2007)
	6-10		2-5	5			Scheer und Schlegel (2008)
5-10		2-3	3-4	4-6	5-8		DWA-M-381 (2007)

u: unbehandelt, e: eingedickt, p: mit Polymeren

Für die Berechnung der Schlammtransportkosten mittels des Tonnenkilopreises wird ein mittlerer TS-Gehalt des Rohschlammes von 5 % angesetzt. Hinsichtlich der Variabilität führt eine objektbezogene Festlegung des TS-Gehaltes zu einer höheren Genauigkeit bei der Ermittlung der zu transportierenden Schlammmasse.

#### Energiebilanz: Bedarf, Bezug, Eigenverbrauch und Einspeisung

Der Energiebedarf wird nach (34) über den, in Abhängigkeit zur Verfahrenstechnik und Anlagengröße stehenden, einwohnerspezifischen elektrischen Energieverbrauch und der am Standort angeschlossenen EW hergeleitet.

$$E_{el,KA,Verbr(n,t)} = E_{el,spez,KA} \cdot N_{EW,KA(n,t)} \quad (34)$$

$E_{el,KA,Verbr}$	Elektrischer Energieverbrauch	(kWh a <sup>-1</sup> )
$E_{el,spez,KA}$	EW-spezifischer elektrischer Energieverbrauch	(kWh EW <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )
$N_{EW,KA}$	Anzahl Einwohnerwerte KA	(EW)

Als Standardeinstellung für die einwohnerspezifischen elektrischen Energieverbräuche wurden die Werte von DWA (2012a) übernommen (Tabelle 4-19). Die vorgegebenen Werte können durch eigene, anhand von Verbrauchsanalysen gewonnene, Werte ersetzt werden.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

**Tabelle 4-19:** Einwohnerspezifische elektrische Energieverbräuche in Abhängigkeit von der Verfahrenstechnik und Anlagengröße nach DWA (2012a)

GK	BB <sub>anaerob</sub>	BB <sub>aerob</sub>	SBR	RTK (kWh EW <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	ATu	ATb	PKA
1		65,2	92,8	53,2	23,8	41,5	19,1
2		44,2	44,4	22,7		35,6	
3	37,9	39,4	50,2	24,7			
4	33,8	36,2	35,2	26,5			
5	31,9						

Bei Anlagen mit Faulgasnutzung wird basierend auf dem Energiebedarf und der erzeugten Energie eine Energiebilanz erstellt, bei welcher der Eigenbedarf, der daraus resultierende Restbedarf oder Überschuss ermittelt wird. Für die Bilanzierung wird angenommen, dass die Deckung des Eigenbedarfs im Vordergrund steht und nur der Überschuss ins Versorgungsnetz eingespeist wird.

In Abhängigkeit von der Differenz aus erzeugter elektrischer Energie und elektrischem Energiebedarf leitet sich bei einem negativen Differenzbetrag die zusätzlich benötigte elektrische Energie nach (35) ab. Nach (36) wird, bei einem positiven Differenzbetrag die in Stromnetz eingespeiste elektrische Energiemenge ermittelt.

$$E_{el,eE(n,t)} = \begin{cases} E_{el,Verbr(n,t)} & ; \text{wenn } \neg \exists(SF) \\ 0 & ; \text{wenn } \exists(SF) \wedge \Delta E_{el} \leq 0 \\ E_{el,Verbr(n,t)} - E_{el,E(n,t)} & ; \text{wenn } \exists(SF) \wedge \Delta E_{el} > 0 \end{cases} \quad (35)$$

$E_{el,eE}$	Elektrischer Energiebezug (extern)	(kWh)
$\Delta E_{el}$	Differenz zw. elektrischer Energieerzeugung und -verbrauch	(kWh)
$E_{el,E(n,t)}$	Erzeugte elektrische Energie	(kWh)

$$E_{el,NE(n,t)} = \begin{cases} 0 & ; \text{wenn } \exists(SF) \wedge \Delta E_{el} \leq 0 \vee \neg \exists(SF) \\ E_{el,E(n,t)} - E_{el,Verbr(n,t)} & ; \text{wenn } \exists(SF) \wedge \Delta E_{el} > 0 \end{cases} \quad (36)$$

$E_{el,NE}$       Netzeinspeisung elektrischer Energie      (kWh)

Neben der elektrischen Energie fällt bei einem BHKW auch thermische Energie an, welche genutzt werden kann. Diese überschüssige Wärme kann zum einen für die Wärmeregulierung der Faulung eigenverwendet oder für die Einspeisung von Wärmeenergie ins Fernwärmenetz genutzt werden. Eine differenzierte Betrachtung wie bei der elektrischen Energieerzeugung findet bei der Wärmeenergieerzeugung nicht statt. Stattdessen wird ausschließlich die Differenz zwischen erzeugter und verbrauchter Wärmeenergie als zur Verfügung stehende, einzuspeisende Energiemenge nach (37) berechnet. Der Verbrauch an thermischer Energie wird als feste Größe angegeben und bleibt über den Betrachtungszeitraum konstant.

$$E_{th,NE(n,t)} = \begin{cases} 0 & ; \text{wenn } \neg \exists(SF) \vee \exists(SF) \wedge \Delta E_{el} \leq 0 \\ E_{th,E(n,t)} - E_{th,Verbr} & ; \text{wenn } \exists(SF) \wedge \Delta E_{el} > 0 \end{cases} \quad (37)$$



$E_{th,NE}$	Einspeisung thermischer Energie	(kWh)
$E_{th,E}$	Erzeugte thermische Energie	(kWh)
$E_{th,Verbr}$	Thermischer Energieverbrauch	(kWh)

Sowohl die ermittelten elektrischen Energieverbräuche als auch die bei vorhandener Faulgasnutzung ggf. überschüssigen und nicht zur Eigenversorgung benötigten elektrischen und thermischen Energiemengen werden an das Modul *KGK* übermittelt. Anhand des Strompreises und des Einspeisevergütungssatzes werden die Stromkosten und die Erträge aus dem Stromverkauf berechnet.

## Schadeinheiten

Auf Grundlage der Schadeinheiten wird über den Abgabesatz in Modul *KGK* die Abwasserabgabe berechnet. Gemäß dem AbwAG wird mittels der Abwasserabgabe die Schädlichkeit des Abwassers beschrieben, welche anhand einzelner Kriterien (Schadstoff- und Schadstoffgruppenparameter) ermittelt wird. Insgesamt wird die Verschmutzungswirkung des Abwassers durch die folgenden 11 Parameter beschrieben: chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Phosphor (P), Stickstoff (N), absorbierbare, organisch gebundene Halogene (AOX), Quecksilber (Hg), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Nickel (Ni), Blei (Pb), Kupfer (Cu), sowie die Verbindungen der genannten Metalle und auch die Giftigkeit des Abwassers gegenüber Fischeiern ( $G_{Ei}$ ). Die einzuhaltenden Schadstoffwerte und Jahresschmutzwassermengen sind nach §7 WHG im Wasserrechtsbescheid (Erlaubnis für das Einleiten von Abwasser in ein Gewässer bzw. in den Untergrund) festgelegt. Diese Angaben enthalten die relevanten Parameter, welche für die Ermittlung der Schadeinheiten herangezogen werden (AbwAG).

Angesichts der abgegrenzten sektoralen Abbildung der Aufgabenbereiche von Aufgabenträgern im Modell, ist nur die Herleitung der Schadeinheiten für die Kalkulation der Abwasserabgabe für das Einleiten des Schmutzwassers integriert. Zudem werden statt der 11 abgaberelevanten Schadstoffe und Schadstoffgruppen nur die drei Schadstoffe, welche in den Objektdaten zur Verfügung standen, betrachtet. Dazu zählen der CSB, N und P. Demzufolge bildet sich die Gesamtsumme der betrachteten Schadeinheiten im Modell für das gesamte Entsorgungsgebiet gemäß (38) aus der Summe der Schadeinheiten der drei Schadstoffe aller KA. Für die Schadeinheiten aus den Frachten der anderen acht Schadstoffe bzw. Schadstoffgruppen wird im Modell angenommen, dass diese über den betrachteten Zeitraum unverändert bleiben. In der Berechnung der Abwasserabgabe im Modul *KGK* werden die nicht betrachteten Schadstoffe bzw. Schadstoffgruppen indirekt mitberücksichtigt.

$$SE_{(t)} = \sum_1^n (SE_{CSB(n,t)} + SE_{P(n,t)} + SE_{N(n,t)}) \quad (38)$$

SE	Summe Schadeinheiten Entsorgungsgebiet	(-)
$SE_{CSB}$	CSB Schadeinheiten KA	(-)
$SE_P$	P Schadeinheiten KA	(-)
$SE_N$	N Schadeinheiten KA	(-)

Die Schadeinheiten der einzelnen Schadstoffe berechnen sich nach (39) aus den im Wasserrechtsbescheid festgelegten Überwachungswerten und der Jahresschmutzwassermenge. Beide Informationen

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

sind in den Objektdaten der KA enthalten. Aus der Anlage zu §3 AbwAG sind die zu erwartenden Schwellenwerte (sowohl in Konzentration als auch als Jahresfracht) als zulässige Konzentrationen der Überwachungswerte enthalten. Für den Einleiter besteht jedoch nach §4 Abs. 5 AbwAG die Möglichkeit, mittels einer Herabklärung, niedrigere Überwachungswerte als die nach §4 Abs.1 AbwAG festgelegten Werte einzuhalten. Dieser Wert wird in Folge dessen dann für den bestimmten Zeitraum zur Abgabenerhebung zu Grunde gelegt. Im Rahmen der staatlichen Gewässeraufsicht obliegt die Überwachung in Form von unangekündigten Kontrollen auf Einhaltung des wasserrechtlichen Bescheides den dafür vorgesehenen staatlichen bzw. staatlich anerkannten Stellen. Die Jahresschmutzwassermenge ist ein theoretischer Wert, welcher aus den bei Trockenwetter gemessenen Werten auf das Jahr extrapoliert wird. Trockenwetterabflüsse sind Abflüsse, welche nicht aufgrund von Niederschlägen oder Tauwetter erhöht sind. Zur Herleitung der Jahresschmutzwassermenge wird der monatliche Tagesmittelwert aus den Einleitungsmengen der Trockenwettertage gebildet und anschließend aus dem Produkt dieser Werte und der Anzahl der Monatstage, die Monatsschmutzwassermenge abgeleitet. Aus der Addition der Monatsschmutzwassermengen resultiert die Jahresschmutzwassermenge. Das Produkt aus dem Überwachungswert und der Jahresschmutzwassermenge ergibt die Jahresschmutzfracht. Resultierend aus dem Quotienten der Jahresschmutzfracht und der Messeinheit ergeben sich die Schadeinheiten. Die zur Berechnung heranzuziehenden Schwellenwerte und Messeinheiten für den CSB, P und N sind in Tabelle 4-20 enthalten. Angepasst an den Vollzug der AbwAG erfolgt auch im Modell eine Abrundung der ermittelten Schadeinheiten.

$$SE_{X(n,t)} = \frac{\ddot{U}W_{X(n,t)} \cdot JSM_{(n,t)}}{ME} \quad (39)$$

SE <sub>X</sub>	Schadstoff-Schadeinheit	(-)
ÜW <sub>X</sub>	Schadstoff-Überwachungswert	(kg m <sup>-3</sup> )
JSM	Jahresschmutzwassermenge	(m <sup>3</sup> )
ME	Messeinheit	(kg)

Tabelle 4-20: Messeinheit, Konzentrations- und Fracht-Schwellenwerte nach Anlage zu §3 AbwAG

Schadstoff	ME (kg)	SW <sub>K</sub> (mg l <sup>-1</sup> )	SW <sub>JM</sub> (kg a <sup>-1</sup> )
CSB	50	20	250
P	3	0,1	15
N <sub>Ges</sub>	25	5	125

Eine Überschreitung des behördlich festgesetzten Überwachungswertes nach §4 Abs. 1 AbwAG oder des selbst erklärten Wertes gemäß §6 Abs. 1 AbwAG führt zu einer Erhöhung der Schadeinheiten. Dabei enthält das AbwAG keine Aussagen zur Definition der Einhaltung des Überwachungswertes. Stattdessen gelten die wasserrechtlichen Regelungen der AbwV in Bezug zu §57 WHG. Demnach gilt gemäß der „4 von 5 Regelung“ (§6 Abs. 1 AbwV) ein Überwachungswert als eingehalten, wenn 4 der letzten fünf Werte von den durchgeführten staatlichen Untersuchungen aus den zurückliegenden drei Jahren diesen nicht überschritten haben. Zum Ausschluss extremer einzelner Ausreißer gilt zudem, dass kein Wert den festgesetzten Überwachungswert um mehr als 100 % übersteigen darf. Die Erhöhung der Schadeinheiten ist für jeden Schadstoff getrennt anzuwenden und setzt sich nach (40) aus dem Produkt des Vmhundertsatzes vom Überwachungswert und dem Überschreitungsfaktor zusammen (§4 Abs. 4 AbwAG). Für die Berechnung des Vmhundertsatzes ist das höchste Messergebnis, welches den Überwachungswert im Veranlagungszeitraum überschreitet, anzusetzen. Der Überschreitungsfaktor wird in Abhängigkeit der Überschreitungshäufigkeit ermittelt. Bei einer einmaligen Überschreitung führt dies zu einer Erhöhung um die Hälfte des Vmhundertsatzes

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

(Überschreitungsfaktor=0,5) und bei mehrmaliger Überschreitung um den vollen Vmhundertsatz (Überschreitungsfaktor=1,0).

$$SE_{\text{Erhöhung}} = SE \cdot \left( \frac{HMW - \bar{UW}}{\bar{UW}} \cdot F_{SE} + 1 \right) \quad (40)$$

$SE_{\text{Erhöhung}}$	Schadeinheitserhöhung	(-)
HMW	Höchstes Messergebnis Veranlagungszeitraum	(mg l <sup>-1</sup> )
$F_{SE}$	Überschreitungsfaktor	(-)

Hinsichtlich der ökonomischen Auswirkungen einer Überschreitung der Schwellenwerte sind Aufgabenträger von sich aus bemüht, diese einzuhalten. In Anbetracht der Prädiktionsschwierigkeit der Häufigkeit des Eintretens einer Überwachungswertüberschreitung, fand trotz ökonomischer Relevanz keine Berücksichtigung der Erhöhung von Schadeinheiten bzgl. Überschreitungen von Schwellenwerten im Modell statt. Stattdessen wurde für die Modellbildung angenommen, dass die Überwachungswerte über den Betrachtungszeitraum eingehalten werden.

#### Personalbedarf und Analyseaufwand

Der Personalbedarf und Analyseaufwand der KA wird für die Prognosesimulation ermittelt, um zukünftige Einsparungen oder Mehraufwände durch Veränderungen der GK mit zu berücksichtigen. Eine Verkleinerung der GK kann bei einer größeren Bevölkerminderung oder einer Erhöhung durch den Ausbau der KA im Zuge einer Überleitung einer anderen KA resultieren. Die Personalkosten werden ermittelt nach (41) aus dem hergeleiteten mittleren Personalaufwand der KA und in Anlehnung an DWA-M-271 (2017) über das Verhältnis aus der mittleren Normalarbeitszeit pro Person und Jahr und dem nach SÜVO der Bundesländer geschätzten Zeitaufwand für die durchzuführenden Untersuchungen sowie Wartungen. In Abhängigkeit von Verfahrenstechnik, Anlagenkomponenten und Anzahl der zu untersuchenden Parameter sowie deren Untersuchungshäufigkeit wird gemäß (42) der jährliche Analyseaufwand über die mittleren Untersuchungskosten je Parameter hergeleitet.

$$K_{P,KA(n,t)} = ZA_{KA(n,t)} \cdot \frac{\bar{K}_{P,B}}{ZA_{KA,voll}} \quad (41)$$

$K_{P,KA}$	Personalkosten KA	(€ a <sup>-1</sup> )
$\bar{K}_{P,B}$	Durchschnittliche Personalkosten Behandlungsanlagen	(€ a <sup>-1</sup> )
$ZA_{KA}$	Zeitaufwand Untersuchungen und Wartung nach SÜVO	(h a <sup>-1</sup> )
$ZA_{KA,voll}$	Normalarbeitszeit pro Person und Jahr (1.840 h)	(h a <sup>-1</sup> )

$$K_{LAB(n,t)} = n_{Para(n,t)} \cdot n_{U(n,t)} \cdot \bar{K}_U \quad (42)$$

$K_{LAB}$	Untersuchungskosten KA	(€ a <sup>-1</sup> )
$n_{Para}$	Anzahl zu untersuchender Parameter	(-)
$n_U$	Untersuchungshäufigkeit	(a <sup>-1</sup> )
$\bar{K}_U$	Durchschnittliche Kosten je Untersuchungsparameter	(€)

### Asset-Assessment

Beim Asset-Assessment der KA wird im Gegensatz zum SWEN wegen fehlender Betrachtungsansätze kein Anlagenzustand ermittelt. Bei den KA wird ausschließlich der mit der Nutzungsdauer im Zusammenhang stehende Reinvestitionszeitpunkt betrachtet. Im Zuge der enthaltenen Objektdaten kann nur auf das Baujahr der Anlage zurückgegriffen werden, weshalb für die Ermittlung des Alters die KA nur als eine Einheit betrachtet wird. In Anbetracht unterschiedlicher Materialeigenschaften und Beanspruchungen von verbauten Komponenten in einer KA, resultieren abweichende Nutzungsdauern und Reinvestitionszeitpunkte dieser Komponenten. Diesbezüglich findet im Modell eine Unterteilung der Anlagentechnik in folgende Komponenten statt: Bautechnik (BT), Maschinenteknik (MT) sowie Elektro-, Steuerungs-, Mess- und Regelungstechnik (ESMR). Anhand des Baujahrs der KA wird über die Nutzungsdauern der drei Anlagenkomponenten deren aktuelles Alter im Investitionszyklus bestimmt und darüber der nächste Reinvestitionszeitpunkt ermittelt.

Für die Fortschreibung der Abschreibungen und Zinsen bei den Aktiva sowie dem Sachanlagevermögen bei den Passiva im Modul *KGK*, werden zur Ermittlung der sich verändernden Kosten und Sachwerte durch die Reinvestition der KA, die Differenzen aus dem Tagesneuwert und den Herstellungskosten nach (43) ermittelt.

$$K_{KA,Reinvest,Diff(n,t)} = \begin{cases} 0 & ; \text{wenn } t_{KA,A} \neq t_{ND,KA} \\ K_{KA,Neu(n,t)} - K_{KA,Alt(n,t)} & ; \text{wenn } t_{KA,A} = t_{ND,KA} \end{cases} \quad (43)$$

$K_{KA,Reinvest,Diff}$	Reinvestitionskostenanteil Fortschreibung im Modell	(€)
$K_{KA,Neu}$	Investitionskosten KA	(€)
$K_{KA,Alt}$	Anschaffungs-/Herstellungskosten KA	(€)
$t_{KA,A}$	Alter KA-Komponente	(-)
$t_{ND,KA}$	Nutzungsdauer KA-Komponente	(-)

Die Ermittlung des Tagesneuwertes erfolgt nach (44) in Abhängigkeit von der Höhe der Inflationsrate und vom Reinvestitionszeitpunkt. Falls sich dieser vor dem Bezugsjahr der Kostenfunktion befindet führt es zu einer Steigerung der Kosten (Anwendung des Kontierungssatzes) und anderenfalls zur Senkung der Kosten (Anwendung des Diskontierungssatzes). Da die über die Kostenfunktionen hergeleiteten Investitionskosten ausschließlich Nettokosten enthalten, wird zur Ermittlung der Bruttokosten für die Investition zum gegenwärtigen und vorherigen Investitionszeitpunkt die Mehrwertsteuer (MwSt) mit einbezogen. Ausgehend vom Bezugszeitpunkt der Prognosesimulation bleibt die MwSt konstant auf dem aktuellen Niveau (siehe Tabelle 4-21).

$$K_{KA,Neu(n,t)} = \begin{cases} \frac{MwSt_{(t)} \cdot K_{KA,KF}}{(1 + r_{Inf})^{(BJ_{KF} - BJ_{Prog} + t)}} & ; \text{wenn } BJ_{Prog} + t < BJ_{KF} \\ MwSt_{(t)} \cdot K_{KA,KF} \cdot (1 + r_{Inf})^{(BJ_{Prog} + t - BJ_{KF})} & ; \text{wenn } BJ_{Prog} + t \geq BJ_{KF} \end{cases} \quad (44)$$

$K_{KA,KF}$	Investitionskosten KA aus Kostenfunktion	(€)
MwSt	Mehrwertsteuer	(-)
$r_{Inf}$	Inflationsrate	(-)

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

---

$BJ_{KF}$	Bezugsjahr Kostenfunktion	(-)
$BJ_{Prog}$	Bezugsjahr Prognose	(-)

Die Herleitung der Herstellungskosten, welche sich vor dem ersten Reinvestitionszeitpunkt der Prognose ergaben, erfolgt nach (45). Neben der Abhängigkeit von der Inflationsrate und des Reinvestitionszeitpunktes besteht eine weitere und zwar in der Lage des Reinvestitionszeitpunktes vom Prognosezeitraum. Bei unterschiedlichen Inflationsraten zwischen Prognosezeitraum und dem Zeitraum, in welchem sich der Reinvestitionszeitpunkt befindet, ergeben sich für die Herleitung der Kosten der jeweiligen Zeiträume Kombinationen aus Aufpreisung und Abpreisung. Befinden sich beide Zeiträume vor oder hinter dem Bezugsjahr der Kostenfunktion, besteht die Gleichung zur Ermittlung der Kosten nur aus einem Term, aus dem Kontierungssatz oder Diskontierungssatz. Dies gilt auch bei gleichen Inflationsraten beider Zeiträume. Der Zeitraum über welchen die Inflation wirkt, entspricht in diesem Fall der Nutzungsdauer. Die Kosten der vorherigen Investition werden nur beim ersten Investitionszyklus nach (45) ermittelt, in den weiteren Zyklen werden die Kosten aus der Matrix über die Nutzungsdauer abgeleitet. Im Gegensatz zur Herleitung der gegenwärtigen Netto-Investitionskosten erfolgt die Herleitung der Netto-Investitionskosten des vorherigen Investitionszeitpunktes in Abhängigkeit von der in diesem Zeitraum geltenden  $MwSt$  (siehe Tabelle 4-21).

$$K_{KA,Alt(n,t)} = \left\{ \begin{array}{l} MwSt_{(t)} \cdot K_{KA,KF} \cdot \left( \frac{1}{(1+r_{Inf,VB})^{|BJ_{KF}-t_{KA}|}} + \frac{1}{(1+r_{Inf})^{(BJ_{Prog}+t-BJ_{KF})}} \right) ; \\ \quad \text{wenn } t_{KA} < BJ_{KF} \wedge BJ_{KF} < BJ_{Prog} + t \\ \\ MwSt_{(t)} \cdot K_{KA,KF} \cdot \left( \frac{1}{(1+r_{Inf,VB})^{|BJ_{KF}-t_{KA}|}} + (1+r_{Inf})^{(BJ_{Prog}+t-BJ_{KF})} \right) ; \\ \quad \text{wenn } t_{KA} < BJ_{KF} \wedge BJ_{Prog} + t \leq BJ_{KF} \\ \\ MwSt_{(t)} \cdot K_{KA,KF} \cdot \left( (1+r_{Inf,VB})^{(t_{KA}-BJ_{KF})} + (1+r_{Inf})^{(BJ_{Prog}+t-BJ_{KF})} \right) ; \\ \quad \text{wenn } t_{KA} \geq BJ_{KF} \wedge BJ_{Prog} + t > BJ_{KF} \\ \\ \frac{MwSt_{(t)} \cdot K_{KA,KF}}{(1+r_{Inf})^{(BJ_{KF}-BJ_{Prog}+t)}} ; \text{ wenn } t_{KA} < BJ_{KF} \wedge BJ_{Prog} + t < BJ_{KF} \\ \\ MwSt_{(t)} \cdot K_{KA,KF} \cdot (1+r_{Inf})^{(BJ_{Prog}+t-t_{KA})} ; \text{ wenn } t_{KA} \geq BJ_{KF} \wedge BJ_{Prog} + t \leq BJ_{KF} \end{array} \right. \quad (45)$$

$t_{KA}$	Baujahr oder Reinvestitionsjahr KA	(-)
$r_{Inf,VB}$	Inflationsrate vor Prognosezeitraum	(-)
$r_{Inf}$	Inflationsrate Prognose	(-)

Ausgehend von den maximalen Nutzungsdauern von Belebungsanlagen sind in Tabelle 4-21 die  $MwSt$  seit 1983 zu entnehmen.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

**Tabelle 4-21:** MwSt seit 1983

Zeitraum	MwSt
1983-1993	14 %
1993-1998	15 %
1998-2007	16 %
ab 2007	19 %

Die im Modul KA implementierten einwohnerspezifischen Kostenfunktionen der unterschiedlichen Verfahrenstechniken und Anlagenkomponenten sind in Tabelle 4-22 abgebildet. Zur Herleitung der Investitionskosten für die Belebungsverfahren werden die Kostenfunktionen von Horstmeyer et al. (2014) angewandt. Da in dieser Studie keine Angaben hinsichtlich Investitionskosten naturnaher Verfahrenstechniken enthalten sind, wurde zur Ermittlung der Investitionskosten dieser Verfahren die Kostenfunktionen von Halbach (2003) herangezogen. In den Investitionskosten beider Studien sind sämtliche Reinigungsstufen und Komponenten enthalten, welche für die Verfahrenstechniken notwendig sind. Unterschiede zwischen den Kostenfunktionen beider Studien bestehen zum einen in den unterschiedlichen Bezugsjahren und zum anderen bei den hergeleiteten Kosten. Zur Ermittlung der Investitionskosten für zusätzliche Anlagenkomponenten einer Faulgasverwertung sind zwei Kostenfunktionen vom MULEWF (2014) implementiert. In der Kostenfunktion (I) sind die Gesamtkosten einer Verfahrensumstellung von einer aeroben zu anaeroben Schlammstabilisierung mit nachgeschalteter Faulung enthalten. Dabei sind die Investitionskosten einer VK mit inbegriffen. Diese Kosten sind zudem durch eine separate Kostenfunktion (II) abgebildet. Aus der Differenz beider Kostenfunktionen lassen sich die Gesamtkosten einer Faulgasverwertung herleiten. In den Investitionskosten des MULEWF (2014) sind die Anlagenkomponenten Faulturm, Zwischen-PWK, maschinelle Voreindickung, Schlammvorlagebehälter, Technikgebäude, Gasspeicher, Gasfackel und BHKW enthalten. Über die EW berechnen sich mittels der Kostenfunktionen von Horstmeyer et al. (2014) und MULEWF (2014) die spezifischen Kosten pro EW und mittels der Kostenfunktionen von Halbach (2003) die Gesamtkosten. Aus dem Produkt der spezifischen Kosten pro EW und den EW am Standort lassen sich die Gesamtkosten berechnen.

**Tabelle 4-22:** Kostenfunktionen für KA-Verfahrenstechniken

KA Typ	Symbol	Kostenfunktion	Bezug	Art	Einheit	Quelle
BB	$K_{BB,KF}$	$14.129 \cdot EW^{-0,401}$	2013	spez. Kosten	(€ EW <sup>-1</sup> )	Horstmeyer et al. (2014)
SBR	$K_{SBR,KF}$	$7.291,50 \cdot EW^{-0,327}$	2013	spez. Kosten	(€ EW <sup>-1</sup> )	
RTK	$K_{RTK,KF}$	$1.500 \cdot EW$	2013	Gesamtkosten	(€)	
ATb	$K_{ATb,KF}$	$7.695 \cdot EW^{0,558}$	2003	Gesamtkosten	(T€)	Halbach (2003)
ATu	$K_{ATu,KF}$	$10,32 \cdot EW^{0,455}$	2003	Gesamtkosten	(T€)	
PKA	$K_{PKA,KF}$	$1,96 \cdot EW^{0,782}$	2003	Gesamtkosten	(T€)	
ZA	$K_{ZA,KF}$	$7.7647 \cdot EW^{-0,6747(I)}$	2013	spez. Kosten	(€ EW <sup>-1</sup> )	MULEWF (2014)
		$2.863,60 \cdot EW^{-0,551(II)}$				

Aus den Gesamtkosten der Anlagen werden über die relativen Kostenanteile der Baukomponenten (BT, MT, ESMR) die jeweiligen Bau-/Herstellungskosten nach (46) ermittelt.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

$$K_{KA,KF(n,t)} = p_{KA,x} \cdot K_{x,KF} \quad (46)$$

$K_{x,KF}$	Kostenfunktion KA-Baukomponenten	(€)
$p_{KA,x}$	Kostenanteil Baukomponentenart	(-)

In Tabelle 4-23 sind die Kostenanteile der Baukomponenten in Anlehnung nach Horstmeyer et al. (2014) und Nutzungsdauern nach DWA (2012c) für die Verfahrenstechniken aufgeführt.

**Tabelle 4-23:** Kostenanteile der Bau-/Herstellungskosten und Nutzungsdauern der Verfahrenstechniken/ Anlagenkomponenten

Verfahrenstechnik/Komponenten	BT		MT		EMSR	
	Anteil	ND	Anteil	ND	Anteil	ND
BB	55	40	29	20	16	15
SBR	51		31		18	
RTK	55		29		16	
ATu	91		6		3	
ATb	73		17		10	
PKA	91	15	6	18	3	10
Faulturm	72	40 <sup>(B)</sup> 25 <sup>(S)</sup>	18		10	
zusätzl Anlagen zur Faulgasnutzung (Gasspeicher, BHKW, Gasfackel)	72	15			10	

(B): Betonkonstruktion, (S): Stahlkonstruktion

Basierend auf den Investitionskosten nach Bau-/Herstellungskosten oder dem Wiederbeschaffungsneuwert und den Nutzungsdauern werden nach (47) die Abschreibungen sowie nach (48) deren Ablösung nach Ablauf der Nutzungsdauer ermittelt. Auf diese Weise kennzeichnet die Ablösung (oder auch Austrag) der Abschreibung, dass der Restbuchwert der Anlagenkomponente aufgebraucht ist und somit keine weitere Abschreibung erfolgt. Zur Herleitung der Abschreibungen sind optional beide Basiswertansätze (Berechnung nach Anschaffungs-/Herstellungskosten bzw. Wiederbeschaffungsneuwert) heranzuziehen. Für die Modellierung gilt die Annahme, dass der gewählte Basiswert für die Abschreibung vor dem Bezugszeitpunkt Bestand hatte und bis zum Prognosehorizont Bestand behält. Bei der Berechnung der Abschreibungsablösung werden beim Ansetzen der Anschaffungs-/Herstellungskosten als Basiswert, die Investitionskosten der vorherigen Investitionsperiode einbezogen. Und bei Zugrundelegung des Wiederbeschaffungsneuwertes werden die Investitionskosten des gegenwärtigen Investitionszeitpunktes impliziert, infolge der Annahme, dass dieser Investitionsbetrag als Wiederbeschaffungsneuwert vorausberechnet wurde.

$$K_{A,KAn(n,t)} = \begin{cases} \frac{K_{KA,Neu(n,t)}}{t_{ND,KA(n,t)}} & ; \text{wenn } \neg \text{WBNW} \\ \frac{K_{KA,Neu(n,t)} \cdot (1 + r_{Inf})^{t_{ND,KA(n,t)}}}{t_{ND,KA(n,t)}} & ; \text{wenn WBNW} \end{cases} \quad (47)$$

$K_{A,KAn}$	Abschreibung KA-Komponenten	(€)
$t_{ND,KA}$	Nutzungsdauer KA-Komponenten	(-)
WBNW	Wiederbeschaffungsneuwert	(-)

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

$$K_{AA,KA(n,t)} = \begin{cases} \frac{K_{KA,Alt(n,t)}}{t_{ND,KA(n,t)}} & ; \text{wenn } \neg \text{WBNW} \\ \frac{K_{KA,Neu(n,t)}}{t_{ND,KA(n,t)}} & ; \text{wenn WBNW} \end{cases} \quad (48)$$

$K_{AA,KA(n,t)}$       Ablösung Abschreibung KA-Komponente      (€)

Die entstehenden Zinskosten für den Bau oder Erneuerung der Anlagenkomponenten berechnen sich nach (49). Nach (50) erfolgt die Berechnung der aufzulösenden Zinskosten des Altkredites.

$$K_{Z,KA(n,t)} = K_{KA,Neu(n,t)} \cdot r_Z \quad (49) \quad K_{ZA,KA(n,t)} = K_{KA,Alt(n,t)} \cdot r_Z \quad (50)$$

$K_{Z,KA(n,t)}$       Zinskosten KA-Komponenten      (€)  
 $K_{ZA,KA(n,t)}$       Zinskostenablösung KA-Komponenten      (€)

Erhaltene Zuschüsse zur Querfinanzierung von KA werden modellseitig bei der Reinvestition berücksichtigt. Da geförderte Sachanlagenwerte abgeschrieben werden können, fallen im Zuge der Reinvestition ausschließlich Zinskosten an, welche in die Betrachtung zu integrieren sind. Basierend auf dem erhaltenen Fördermittelgesamtbetrag findet nach (51) zur Ermittlung des zusätzlichen Zinsaufwandes eine einwohnerspezifische Umverteilung auf alle KA statt.

$$K_{Z,FöM,KA(t)} = \frac{FöM_{KA,Ges}}{\sum_{i=1}^n N_{EW,KA,Dim(n)}} \cdot N_{EW,KA,Dim(n)} \quad (51)$$

$K_{Z,FöM,KA}$       Zinsaufwände Refinanzierung geförderter KA      (€)  
 $FöM_{KA,Ges}$       Gesamtsumme Fördermittel KA      (€)  
 $N_{EW,KA,Dim}$       Ausbaugröße KA      (EW)

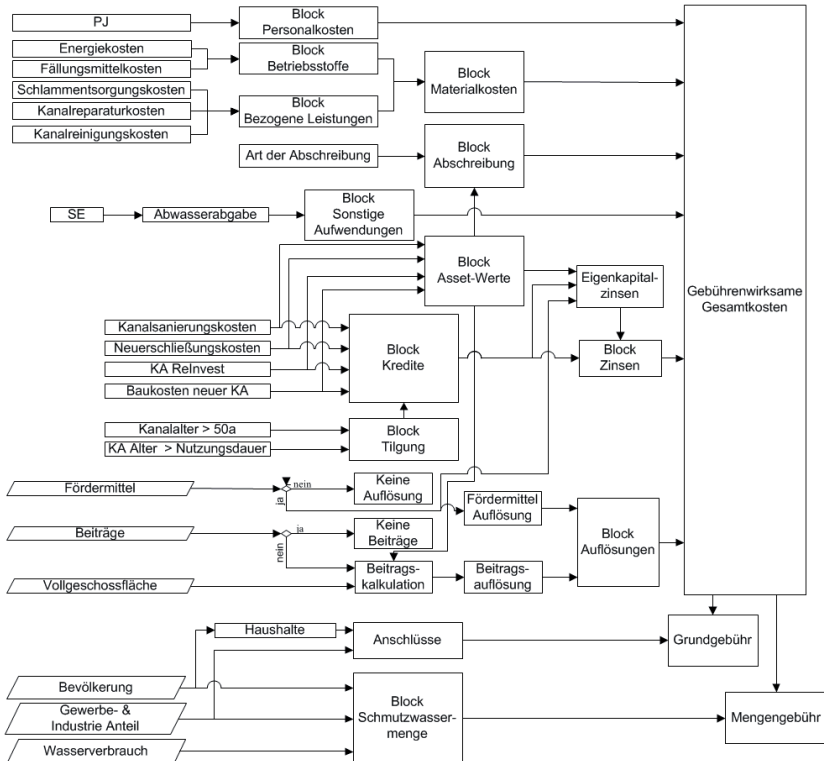
Detailliertere Erläuterungen zu den Abschreibungen und Zinskosten folgen in Kap. 4.4.3.

#### 4.4.3 Modul KGK

Im Modul *KGK* findet die Zuordnung aller prozessrelevanten Kosten in die durch das Handelsgesetzbuch (HGB) vorgegebene Kostenstruktur statt. Bei der Abbildung werden die organisatorischen und finanziellen Strukturen berücksichtigt. Sämtliche kostenrelevanten prozessbasierten Parameter der Module *SWEN* und *KA* laufen in der Berechnung des Moduls *KGK* zusammen. Die Rahmenbedingungen der Kostenrechnung werden durch die länderspezifischen KAG flankiert. In Abhängigkeit von internationalen Gesetzmäßigkeiten und Unterschieden in der Landesgesetzgebung sind in diesem Modul Anpassungen vorzunehmen. Für die Ermittlung der gebührenwirksamen Gesamtkosten sind die Beitragserhebung sowie der Erhalt von Zuschüssen und Fördermitteln als auch deren Auflösungen zu berücksichtigen. Die Gebührengestaltung ist in der Gebührensatzung des Aufgabenträgers verankert und gibt die Unterteilung in eine Mengengebühr und ggf. Grundgebühr vor. Eine vereinfachte und zusammenfassende schematische Darstellung hinsichtlich des Aufbaus und Rechenalgorithmus des Moduls gibt Abbildung 4-23.



#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells



**Abbildung 4-23:** Schematische Darstellung der Berechnungsabläufe des Moduls KGK

In Analogie zu den anderen Modulen werden folgend nur jene Parameter aus dem Modul hergeleitet, welche für das anschließende Verständnis des Rechenalgorithmus erforderlich sind.

#### Kostenstruktur

Die Ertragsstruktur ist abhängig von den zusätzlichen Dienstleistungen, Erzeugnissen und den gebührenmindernden Auflösungen. Außer den Erträgen aus energetischen Erzeugnissen und den Auflösungen findet modellseitig aufgrund der Unbestimmbarkeit keine weitere Betrachtung von Erträgen statt. Sämtliche weiteren Erträge werden in der Berechnung als konstant betrachtet und jährlich fortgeführt. Aus der Summe der Aufwände und Kosten bilden sich abzüglich der Erträge die gebührenwirksamen Gesamtkosten. Dabei ist der Rahmen, in welchem die Kostenumlegung auf die Gebühr stattfinden darf nach oben durch das Kostenüberschreitungsverbot und nach unten durch das

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Kostendeckungsgebot begrenzt (Wittling 1996). Beeinflusst von der Struktur, den Verantwortungsbereichen und Aufgabengebieten des Aufgabenträgers werden Kostenstellen gebildet. Als Ort der Kostenentstehung werden die Kosten diesen Stellen zugeordnet, diese lassen sich wiederum den Kostenarten zuweisen. Im Modell existieren in Anlehnung an die Module folgende Kostenstellen: Verwaltung, Behandlungsanlagen und Kanalnetz.

Die Zuordnung der im Modell betrachteten Kosten in die zugehörigen Kostenstellen und Kostenarten ist in Tabelle 4-24 aufgeführt.

**Tabelle 4-24:** Zuordnung der betrachteten Kosten im Modell in Kostenstellen und Kostenarten

Kostenart	Verwaltung	Behandlungsanlagen	Kanalnetz
Personal	Verwaltungspersonal	Betriebspersonal	Betriebspersonal
Betriebsmittel		Energie, Fällmittel	Energie
Bezogene Leistungen		Schlammentsorgung	Kanalreinigung Kanalreparatur
Zinsen	Gebäude, Sonstiges	KA	SWEN
Sonstige Aufwendungen		Abwasserabgabe	
Abschreibungen	Gebäude, Sonstiges	KA	SWEN

Die Kostenarten können in Betriebskosten und Kapitalkosten gruppiert werden. Bei den Betriebskosten werden alle Kosten zusammengefasst, welche beim Betrieb, der Unterhaltung sowie bei der Überwachung von Anlagen entstehen. Demnach gehören die Personalkosten, Materialkosten und zum Teil sonstige Aufwendungen in diese Eingruppierung. Kapitalkosten entstehen beim Einsatz von Eigen- oder Fremdkapital für Investitionen. Zu den Kapitalkosten gehören sowohl die Abschreibungen, Zinskosten in Form von Fremdkapitalkosten als auch die kalkulatorische Eigenkapitalverzinsung als Form von Eigenkapitalkosten.

Basierend auf den in Tabelle 4-24 gelisteten Kostenarten ist nach §§ 275 HGB eine GuV aufzustellen. Nach Abzug der Abschreibungen von allen Kostenarten resultieren aus der Differenz die aufwandsfähigen Kosten. Aus der Summe der aufwandsfähigen Kosten und der kalkulatorischen Kosten (kalkulatorische Abschreibungen und Eigenkapitalverzinsung) sowie abzüglich kostenmindernder Erlöse und Erträge (Auflösung von Beiträgen und Investitionszuschüssen) berechnen sich die gebührenwirksamen Kosten. Die Umlegung der gebührenwirksamen Kosten auf die Gebührenzahler erfolgt in der Regel in Form einer Mengen- und einer Grundgebühr. Bedingt durch die Gebührengestaltung besteht auch die Möglichkeit der ausschließlichen Erhebung einer Mengengebühr. Grundsätzlich dient die Grundgebühr zur Deckung der Fixkosten (verbrauchsunabhängig) und die Mengengebühr zur Abdeckung des Arbeitspreises, welche als variable Kosten (verbrauchsabhängig) deklariert werden.

Im Modell erfolgt die Berechnung der jährlichen Kosten in den Kostenarten statt über absolute Kosten ausschließlich über die Differenzen zwischen den Jahren. Auf diese Weise werden die nicht im Modell hergeleiteten Kosten inkludiert.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Im Folgenden werden die Herleitungen der Kostenarten sowie alle ökonomischen Kenngrößen, welche für die Gebührenberechnung notwendig sind, beschrieben.

##### Personalkosten

Im Modell ergeben sich die Gesamtpersonalkosten für den Aufgabenträger nach (52) aus den Personalkosten für Verwaltung, Behandlungsanlagen und Kanalnetz. Auf der Eingabe der Personalkosten für den Bezugszeitpunkt der Simulation basiert deren jährliche Fortschreibung.

$$K_{P,Ges(t)} = K_{P,V(t)} + K_{P,KA(t)} + K_{P,Kan(t)} \quad (52)$$

$K_{P,Ges}$	Personalkostengesamt	(€)
$K_{P,V}$	Personalkosten Verwaltung	(€)
$K_{P,KA}$	Personalkosten Behandlungsanlagen	(€)
$K_{P,Kan}$	Personalkosten Kanalnetz	(€)

Die Personalkosten der drei Kostenstellen werden nach (53) ermittelt. Veränderungen bei den Personalkosten ergeben sich gemäß (54) durch Gehaltsanpassungen und Veränderungen der Mitarbeiteranzahl. Für das Bezugsjahr der Simulation zum Zeitpunkt  $t=1$ , entsprechen die Personalkosten den Eingabewerten.

$$K_{P,X(t)} = \begin{cases} K_{P,X(1)} & ; \text{wenn } t = 1 \\ K_{P,X(t-1)} + \Delta K_{P,X(t)} & ; \text{wenn } t > 1 \end{cases} \quad (53) \quad \Delta K_{P,X(t)} = (K_{P,X(t-1)} + G_X + \Delta K_{P,MA,X(t)}) \quad (54)$$

$K_{P,X}$	Personalkosten je Kostenstelle	(€)
$\Delta K_{P,X}$	Personalkostenveränderung je Kostenstelle	(€)
$G_X$	Gehaltsanpassung je Kostenstelle	(€)
$\Delta K_{P,MA,X}$	Personalkosten durch Veränderung Mitarbeiteranzahl je Kostenstelle	(€)

Nach (55) berechnet sich die jährliche Gehaltsanpassung aus der Gehaltssteigerungsrate und den Personalkosten der Kostenstelle. Optional kann die Gehaltssteigerungsrate dem inflationären Geldwertverlust gleichgesetzt werden. Durch die Angabe der Veränderung der Mitarbeiterzahl (Stellenzuwachs oder Stellenabbau) in den Kostenstellenbereichen bis zum Prognosehorizont resultiert aus dem durchschnittlichen Gehalt und der Veränderung der Mitarbeiterzahl die dadurch bedingte Personalkostenveränderung. Hinsichtlich der zeitlichen Unbestimmtheit des Stellenabbaus oder Stellenzuwachses wird im Modell die Veränderung der Mitarbeiterzahl über den Prognosezeitraum gemittelt. Basierend auf dieser vereinfachten Annahme findet eine durchschnittliche Berücksichtigung von Personalstärkeveränderungen über den Prognosezeitraum statt. Somit werden höhere Über- oder Unterschätzungen in den einzelnen Jahren vermieden. Die Herleitung der Personalkostenveränderung durch die Mitarbeiterzahl nach (56) gilt nur für die Bereiche Verwaltung und Kanalnetz.

$$G_X = K_{P,X(t-1)} \cdot r_G \quad (55) \quad \Delta K_{P,MA,X(t)} = \bar{K}_{P,X(t-1)} \cdot \Delta N_{MA,X} \quad (56)$$

$r_G$	Jährliche Gehaltssteigerungsrate	(-)
$\bar{K}_{P,X}$	Durchschnittlicher Gehalt pro Mitarbeiter in Kostenstelle	(€)
$\Delta N_{MA,X}$	Veränderung Mitarbeiterzahl in der Kostenstelle	(-)

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Für den Bereich Behandlungsanlagen findet bei der Berechnung der Personalkostenveränderung durch Schwankungen der Mitarbeiterzahl gemäß (57) der Personalbedarf der KA zusätzliche Berücksichtigung, welcher sich durch Veränderungen der GK im Zuge von Bevölkerungsveränderungen, Stilllegungen oder Überleitungen ergibt, statt.

$$K_{PV,B(t)} = \bar{K}_{P,X(t-1)} \cdot \bar{\Delta N}_{MAX} + \sum (K_{P,KA(n,t)} - K_{P,KA(n,t-1)}) \quad (57)$$

$K_{P,KA(n,t)}$       Personalkosten je KA      (€)

#### Materialaufwand

Der Materialaufwand setzt sich aus den Betriebsstoffen und den bezogenen Leistungen zusammen (58). Unter Betriebsstoffe sind hier die Kosten für Hilfs-, Roh- und Betriebsstoffe zusammengefasst. Betriebsstoffe sind Mittel, welche zur Betriebsführung der Abwasserentsorgung notwendig sind. Sie zählen zu den variablen Kosten, da ein Großteil dieser Kosten unmittelbar im Zusammenhang mit der Abwassermenge bzw. Stofffracht steht. Mit Zunahme der Abwassermenge bzw. Stofffracht erhöht sich auch der Betriebsstoffeinsatz. Bei den bezogenen Leistungen handelt es sich um in Anspruch genommene Fremdleistungen von externen Dienstleistern. Auch in dieser Kostenart ist ein Großteil der Kosten variabel. In Abhängigkeit von den in Eigenleistung erbrachten Aufgaben existieren, bezogen auf die enthaltenen Kostenpositionen, größere Abweichungen zwischen den Aufgabenträgern. Dies reicht von der Fremdvergabe kleinerer Dienstleistungen (z.B. Kanalreinigung, Schlammentsorgung, IT, EDV, usw.) bis hin zur Fremdvergabe der Betriebsführung.

$$K_{M(t)} = K_{B(t)} + K_{L(t)} \quad (58)$$

$K_M$	Materialaufwand	(€)
$K_B$	Betriebsstoffe	(€)
$K_L$	Bezogene Leistungen	(€)

Modellseitig werden von den Betriebsstoffen nach (59) ausschließlich die Energiekosten und die Fällmittelkosten anhand von prozessbasierten Parametern hergeleitet. Sämtliche weiteren nicht betrachteten Kosten stehen, unter Angabe des Anteils der unberücksichtigten, mengenbezogenen Betriebskosten, in Abhängigkeit zur relativen jährlichen Veränderung der Schmutzwassermenge. Diese ergibt sich aus der Veränderung des häuslichen Wasserverbrauchs und der des Gewerbe- und Industrieanteils. Alle Kosten unterliegen den inflationären Einflüssen.

$$K_{B(t)} = (K_{B(t-1)} + f_{MB,B} \cdot r_{SW} \cdot K_{B,UK(t-1)} + \Delta K_{FM(t)}) \cdot (1 + r_{Inf}) + \Delta K_{En,el(t)} \quad (59)$$

$\Delta K_{En,el}$	Kostenveränderung elektrische Energie	(€)
$\Delta K_{FM}$	Veränderung Fällmittelkosten	(€)
$K_{B,UK}$	Unberücksichtigte Kosten Betriebsstoffe	(€)
$f_{B,var}$	Faktor mengenbeeinflusster Anteil Betriebsstoffe	(-)
$r_{Inf}$	Inflationsrate	(-)
$r_{SW}$	Veränderungsrate Schmutzwassermenge	(-)

Aus den Energiebilanzierungen resultieren in der Summe die elektrischen Energiegesamtverbräuche aller KA im Entsorgungsgebiet des Aufgabenträgers. Unter Berücksichtigung der Energiepreis-

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

steigerung ergeben sich nach (60) - basierend auf den jährlichen Differenzen des elektrischen Energieverbrauchs - die elektrischen Energiekosten.

$$\Delta K_{En,el(t)} = \begin{cases} K_{En,el(1)} & ; \text{wenn } t = 1 \\ K_{En,el(t-1)} + \sum_{1}^n \Delta E_{el,V(n,t)} \cdot P_{kWh} \cdot (1 + r_{Inf,En}) & ; \text{wenn } t > 1 \end{cases} \quad (60)$$

$K_{En,el}$	Kosten elektrischer Energiebezug	(€)
$E_{el,Verbr}$	Elektrischer Energieverbrauch	(kWh)
$P_{kWh}$	Energiepreis	(€ kWh <sup>-1</sup> )
$r_{Inf,En}$	Energiepreissteigerungsrate	(-)

Die Fällmittelkosten leiten sich nach (61) aus dem Fällmittelbedarf, dem Preis für die Fällmittel und deren Anteile bezogen auf den Einsatz im Entsorgungsgebiet ab. Bedingt durch die zur Verfügung stehende Datengrundlage findet im Modell keine anlagendifferenzierte Kostenermittlung statt, sondern eine anteilige Gesamtbetrachtung der verwendeten Fällmittel.

$$\Delta K_{FM(t)} = K_{FM(t-1)} + A_{FM,Fe} \cdot \sum_{1}^n \Delta X_{P,Fall(n,t)} \cdot P_{FM,Fe} + A_{FM,Al} \cdot \sum_{1}^n \Delta X_{P,Fall(n,t)} \cdot P_{FM,Al} \quad (61)$$

$K_{FM}$	Fällmittelkosten	(€)
$A_{FM,X}$	Anteil eingesetzter Fällmittel	(-)
$X_{P,Fall}$	Fällmittelbedarf	(kg Fe)
$P_{FM,Fe}$	Preis Eisen-Fällmittel	(€ kg <sup>-1</sup> Fe <sup>-1</sup> )
$P_{FM,Al}$	Preis Aluminium-Fällmittel	(€ kg <sup>-1</sup> Al <sup>-1</sup> )

Bei den bezogenen Leistungen werden die Kanalreparaturkosten, Kanalreinigungskosten und Schlammentsorgungskosten durch prozessbasierte Parameter hergeleitet. Mengenbeeinflusste Kosten werden mittels eines Faktors gemäß (62) berücksichtigt.

$$K_{L(t)} = \begin{cases} K_{L(1)} \\ (K_{L(t-1)} + f_{L,var} \cdot r_{SW} \cdot K_{L(t-1)}) \cdot (1 + r_{Inf}) + \Delta K_{Rep,Ges(t)} + \Delta K_{Rein,Ges(t)} + \Delta K_{KSE(t)} \end{cases} \quad (62)$$

$f_{L,var}$	Faktor mengenbeeinflusster Anteil bezogener Leistungen	(-)
$\Delta K_{Rep,Ges}$	Veränderung Kanalreparaturkosten	(€)
$\Delta K_{Rein,Ges}$	Veränderung Kanalreinigungskosten	(€)
$\Delta K_{KSE}$	Veränderung Klärschlamm Entsorgungskosten	(€)

Reparaturen dienen der Behebung von örtlich begrenzten Schäden, bei denen nur Teilbereiche von Haltungen saniert werden. Auf diese Weise ergibt sich keine wesentliche Verlängerung der Nutzungsdauer, weshalb bei hauptsächlichlicher Weiternutzung bestehender Sachanlagenwerte, Reparaturen nicht zu den investiven Maßnahmen zählen. Diesbezüglich sind Reparaturen im Gegensatz zu Renovierungen und Erneuerungen direkt als Erhaltungsaufwand anzusetzen und sind somit im vollen Umfang im Jahr der Entstehung gebührenwirksam. Über die Verteilung der Kanalnetzanteile in den Kohorten des Kanalalterungsmodells werden die reparaturbedürftigen

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Leitungslängen abgeleitet. Als reparaturbedürftig zählen im Modell die Kanalnetzanteile, welche sich in ZK 0 bis ZK 2 befinden. Basierend auf der Angabe der Reparaturkosten im Bezugsjahr leiten sich über die betreffende Leitungslänge der ZK die durchschnittlichen längenspezifischen Reparaturkosten ab. Hinsichtlich steigender Reparaturaufwände bei steigender Schadensgröße oder Schadensanzahl, findet über einen Kostensteigerungsfaktor eine pauschale Erhöhung der mittleren längenspezifischen Reparaturkosten statt (63).

$$K_{\text{Rep,Ges}(t)} = \sum_{n=1}^3 f_{\text{Kosten,ZK}_n} \cdot k_{\text{Rep}(t)} \cdot L_{\text{ZK}(n,t)} \cdot (1 + r_{\text{Inf}}) \quad (63)$$

$K_{\text{Rep,Ges}}$	Gesamtkosten Kanalreparatur	(€)
$f_{\text{Kosten,ZK}}$	Kostenfaktor ZK	(-)
$k_{\text{Rep}}$	längenspezifische Reparaturkosten	(€ km <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )
$L_{\text{ZK}}$	Kanalleitungslängen ZK	(km)

Mit:

$$\begin{aligned} F_{\text{Kosten,ZK}_0} &= 1.5 \\ F_{\text{Kosten,ZK}_1} &= 1 \\ F_{\text{Kosten,ZK}_2} &= 0.5 \end{aligned}$$

Anhand der Angabe der jährlichen Kanalreinigungsquote werden nach (64) über die Kanalnetzlänge und die längenspezifischen Kosten die Kanalreinigungskosten für das Entsorgungsgebiet des Aufgabenträgers gebildet. Mit der Beeinflussung der Schmutzwassermenge durch den häuslichen Wasserverbrauch als Rahmenparameter ist eine vereinfachte Berücksichtigung der Transportbedingungen und der damit verbundenen Kosten integriert. Durch geringere Abwassermengen sinkt die Fließgeschwindigkeit in den Kanälen, wodurch das Potential der Bildung von Ablagerungen steigt und sich der Aufwand für Kanalreinigungen erhöht. Hinsichtlich vieler Einflüsse, welche auf die Sedimentation, Ablagerungsbildung (Aggregation) und Remobilisierung wirken (Gebhard 2009, Kirchheim 2005, Schönherr 2003, Borovsky 2001, Ristenpart 1995) werden bei der Herleitung der Kanalreinigungskosten die beeinflussenden Effekte zusätzlich durch einen Faktor berücksichtigt.

$$K_{\text{Rein,Ges}(t)} = f_{\text{MB}} \cdot r_{\text{SW}} \cdot r_{\text{KanRein}} \cdot L_{\text{Ges}(t)} \cdot K_{\text{Rein}} \cdot (1 + r_{\text{Inf}}) \quad (64)$$

$K_{\text{Rein,Ges}}$	Kanalreinigungskosten	(€)
$f_{\text{MB}}$	Mengenbeeinflussungsfaktor	(-)
$r_{\text{KanRein}}$	Kanalreinigungsrate	(-)
$L_{\text{Ges}}$	Kanalleitungslänge gesamt	(km)
$k_{\text{Rein}}$	Längenspezifische Reinigungskosten	(€ km <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )

#### Zinsaufwand

Investitionen in Infrastrukturmaßnahmen werden von Körperschaften des öffentlichen Rechts (Zweckverbände, Eigenbetriebe) überwiegend durch Kommunalkredite (auch Kommunaldarlehen genannt) finanziert. Als Kreditgeber kommen generell alle Kreditinstitute in Frage, jedoch werden Kommunalkredite vorwiegend von öffentlich-rechtlichen Kreditinstituten vergeben. Diese Kredite werden durch das Recht zur Erhebung von Beiträgen und Gebühren, ohne Sicherheiten vergeben. Die

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Kreditvergabe erfolgt durch Prüfung der Zahlungsfähigkeit basierend auf dem Haushaltsplan und den weiteren Verpflichtungen aus bestehenden Schuldverhältnissen. Aus der Summe der zu zahlenden Zinsen aus den unterschiedlichen Kreditbeträgen und Zinssätzen, resultiert der jährliche Zinsaufwand für den Aufgabenträger. Der Zinsaufwand berechnet sich im Modell nach (65). Basierend auf dem Ausgangswert berechnet sich der Zinsaufwand aus den Zinskosten von neuen aufgenommenen Krediten und den nicht mehr zu zahlen Zinskosten aus abgelösten Krediten. Hinzu kommen Zinskosten aus Refinanzierungen zuvor geförderter Sachanlagenwerte. In der Simulationsberechnung ist der Zinssatz über den Betrachtungszeitraum konstant.

$$K_{Z(t)} = K_{Z,V(t)} + K_{Z,KA(t)} + K_{Z,F\bar{0}M,KA(t)} + K_{Z,Kan(t)} + K_{Z,F\bar{0}M,Kan(t)} \quad (65)$$

$K_Z$	Zinsaufwand (gesamt)	(€)
$K_{Z,V}$	Zinsaufwand Kostenstelle Verwaltung	(€)
$K_{Z,KA}$	Zinsaufwand Kostenstelle KA	(€)
$K_{Z,F\bar{0}M,KA}$	Zinsaufwand Refinanzierung geförderter KA-Komponenten	(€)
$K_{Z,Kan}$	Zinsaufwand Kostenstelle Kanalnetz	(€)
$K_{Z,F\bar{0}M,Kan}$	Zinsaufwand Refinanzierung geförderter Kanallängen	(€)

Die Zinsaufwände aus dem Bereich Verwaltung enthalten die Kredite des Sachanlagevermögens, welches weder den Behandlungsanlagen noch dem Kanalnetz zuzuordnen ist. Für die Sachanlagen der Verwaltung gilt, dass die Anzahl gleichbleibt und sich deren Wert ausschließlich durch inflationäre Einflüsse verändert. Nach (66) berechnet sich der Zinsaufwand der Verwaltung aus den Zinskosten des neuen Kredites nach (67) für die Reinvestitionen der Sachanlagewerte und der Zinsablösung des vorherigen Kredites zur Finanzierung gemäß (68).

$$K_{Z,V(t)} = K_{Z,V,SW(t)} - K_{ZA,V,SW(t)} \quad (66)$$

$K_{Z,V,SW}$	Zinsaufwand Sachanlagewerte Verwaltung	(€)
$K_{ZA,V,SW}$	Zinsablösung Sachanlagewerte Verwaltung	(€)

$$K_{Z,V,SW(t)} = \begin{cases} K_{Z,V(1)} & ; \text{wenn } t = 1 \\ K_{Z,V(t-1)} & ; \text{wenn } t > 1 \wedge \bar{t}_{V,SW} \neq t_{ND,V,SW} \\ K_{SWV(t-1)} \cdot (1 + r_{Inf})^{(t_{ND,SWV})} \cdot r_Z & ; \text{wenn } t > 1 \wedge \bar{t}_{V,SW} = t_{ND,V,SW} \end{cases} \quad (67)$$

$K_{V,SW}$	Sachanlagewerte Verwaltung	(€)
$r_Z$	Kreditzinssatz	(-)
$\bar{t}_{V,SW}$	Durchschnittliches Sachanlagenalter	(a)
$t_{ND,V,SW}$	Nutzungsdauer Sachanlagewerte	(a)

$$K_{ZA,V,SW(t)} = \begin{cases} 0 & ; \text{wenn } \bar{t}_{V,SW} \neq t_{ND,V,SW} \\ K_{V,SW(t-1)} \cdot \frac{1}{(1 + r_{Inf,VB})^{(t_{ND,V,SW} - t)}} \cdot r_{Z,vB} & ; \text{wenn } \bar{t}_{V,SW} = t_{ND,V,SW} \wedge t_{ND,V,SW} - t < 0 \\ K_{V,SW(t-1)} \cdot (1 + r_{Inf})^t \cdot r_Z & ; \text{wenn } \bar{t}_{V,SW} = t_{ND,V,SW} \wedge t_{ND,V,SW} - t \geq 0 \end{cases} \quad (68)$$

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

$r_{Z,VB}$  Kreditzinssatz vor Betrachtungszeitraum (-)

Die Ermittlung der Zinsaufwände für die KA ist aufgrund des Rechenalgorithmus im Modul *KA* integriert. Im Modul *KKG* werden die aufsummierten Zinskosten der einzelnen Komponenten und die Zinsablösung der vorherigen Kredite nach (69) miteinander verrechnet.

$$K_{Z,KA(t)} = \begin{cases} K_{Z,KA(1)} & ; \text{wenn } t = 1 \\ K_{Z,KA(t-1)} & ; \text{wenn } t > 1 \wedge t_{KA(n,t)} \neq t_{ND,KA(n)} \\ K_{Z,KA(t-1)} + \sum_{i=1}^n (K_{Z,KAn(n,t)} - K_{ZA,KAn(n,t)}) & ; \text{wenn } t > 1 \wedge t_{KA(n,t)} = t_{ND,KA(n)} \end{cases} \quad (69)$$

$K_{Z,KAn}$	Zinsaufwand KA-Komponenten	(€)
$K_{ZA,KAn}$	Zinsablösung KA-Komponenten	(€)

Zinsaufwände gemäß (70) ergeben sich aus den Investitionen für Erneuerungen und Renovierungen des Kanalnetzes nach (71), den Neuerschließungen nach (72) sowie den Ablösungen alter Kredite und den damit verbundenen Zinsen nach (73). Bei der Berechnung der Auflösung von Zinskosten wird der vorherige Investitionszeitpunkt berücksichtigt. Liegt dieser vor dem Bezugsjahr, findet eine Diskontierung bzw. liegt dieser im Betrachtungszeitraum findet eine Kontierung statt. Die Zinskosten für die Kredite der Neuerschließungen werden in die Gesamtkosten der Zinsaufwände übertragen und werden am Ende der Nutzungsdauer bei der Ablösung des Kredites und den damit verbundenen Zinskosten berücksichtigt. Für die Herleitung der Zinskostenablösung werden die Informationen über die in den jeweiligen Altersklassen befindlichen Kanalkilometer aus der Matrix der Altersklassen des Moduls *SWEN* verwendet. Basierend auf diesen Informationen lässt sich das Ende der Nutzungsdauer für die entsprechenden Kanalanteile bestimmen. Durch die Zinsen der Kreditneuaufnahme und die Ablösung des Altkredites wird die Differenz der Zinskostensteigerung bzw. -minderung gebildet. Eine Minderung der Zinskosten erfolgt z.B. bei Kanalnetzen mit einem durchschnittlichen hohen Alter und bei einer gleichzeitig geringen Sanierungsquote. Aufgrund der geringen Investitionssummen sinken die Kreditsumme und resultierend auch die Zinskosten.

$$K_{Z,Kan(t)} = K_{Z,KanSan(t)} - K_{ZA,KanSan(t)} + K_{Z,KanNeu(t)} \quad (70)$$

$K_{Z,KanSan}$	Zinsaufwand Kanalerneuerung bzw. -renovierung	(€)
$K_{Z,KanNeu}$	Zinsaufwand Neuerschließungen	(€)
$K_{ZA,Kan}$	Zinsablösung Kostenstelle Kanalnetz	(€)

$$K_{Z,KanSan(t)} = L_{Ges(t)} \cdot r_{KanSan} \cdot k_{KanSan,spez} \cdot (1 + r_{Inf})^{t_{ND,KanSan}} \cdot r_Z \quad (71)$$

$L_{Ges}$	Gesamtlänge SWEN	(m)
$r_{KanSan}$	Kanalsanierungsquote (bezogen auf Erneuerung und Renovierung)	(-)
$k_{KanSan,spez}$	Längenspezifische Kanalsanierungskosten	(€ m <sup>-1</sup> )
$t_{ND,KanSan}$	Nutzungsdauer erneuerter und sanierter Leitungen	(-)

$$K_{Z,KanNeu(t)} = L_{Ges(t)} \cdot r_{KanNeu} \cdot k_{KanNeu,spez} \cdot (1 + r_{Inf})^{t_{ND,KanNeu}} \cdot r_Z \quad (72)$$

$r_{KanNeu}$	Neuerschließungsquote	(-)
--------------	-----------------------	-----



#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

	$k_{\text{KanNeu, spez}}$	Längenspezifische Kanalneuerschließungskosten	(€ m <sup>-1</sup> )
	$t_{\text{ND, KanNeu}}$	Nutzungsdauer von neuen Leitungen	(-)

$$K_{\text{ZA, KanSan}(t)} = \begin{cases} \left( L_{\text{Ges}(t)} \cdot r_{\text{KanSan}} + \frac{\Delta L_{\text{AK, 56}(t)}}{10} \right) \cdot k_{\text{KanSan, spez}} \cdot \frac{1}{(1 + r_{\text{Inf, VB}})^{(t_{\text{ND, KanSan}} - t)}} \cdot r_{\text{Z, VB}} ; \\ \text{wenn } t - t_{\text{ND, KanSan}} < 0 \\ \\ \left( L_{\text{Ges}(t)} \cdot r_{\text{KanSan}} + \frac{\Delta L_{\text{AK, 56}(t)}}{10} \right) \cdot k_{\text{KanSan, spez}} \cdot (1 + r_{\text{Inf}})^{(t - t_{\text{ND, KanSan}})} \cdot r_{\text{Z}} ; \\ \text{wenn } t - t_{\text{ND, KanSan}} \geq 0 \end{cases} \quad (73)$$
  

$\Delta L_{\text{AK, 56}(t)}$	Übergang AK 5 (<50 a) zu AK 6 (>50 a)	(m)
-------------------------------	---------------------------------------	-----

Im Modell werden zudem die durch Fördermittel finanzierten Sachanlagenwerte und somit auch die betreffenden Kanalleitungslängen berücksichtigt. Diese fremdfinanzierten Sachanlagenwerte sind bei den Abschreibungen bereits enthalten. Durch die Fremdfinanzierung werden bei der Anschaffung und Herstellung keine Kredite aufgenommen, dies erfolgt jedoch, wenn bei der Refinanzierung dieser Sachanlagenwerte keine erneute Förderung stattfindet. Im Gegensatz zur Herleitung der Zinskosten aus der Refinanzierung von geförderten KA Komponenten, welche aufgrund des Rechenalgorithmus im Modul KA integriert ist, findet die Herleitung der Zinskosten für das SWEN nach (74) im Modul KGK statt. Unter Berücksichtigung der Inflation berechnen sich diese Zinskosten aus dem Restwert der noch nicht berücksichtigten zuvor zugewendeten Finanzmittel in den Zinskosten für das Kanalnetz nach (75) und der jährlichen Investitionssumme für Erneuerung bzw. Sanierung in das Kanalnetz in der von der Förderung betroffenen Kanalaltersklasse nach (76). Anhand dieses Ansatzes findet zum Ende der Nutzungsdauer der jeweiligen Kanalnetzanteile die Berücksichtigung vorheriger Fördersummen statt. Für den Fall, dass keine Fördermittel erworben wurden oder der zu berücksichtigende Restbetrag aufgebraucht ist, wird der Wert für die Zinsaufwände, welche sich aus der Refinanzierung von geförderten Kanallängen ergeben, auf null gesetzt.

$$Z_{\text{FöM, Kan}(t)} = \begin{cases} \sum_{n=1}^3 \left[ (\text{FöM}_{\text{Kan, AK}(n, t)}) \cdot (1 + r_{\text{Inf}})^{t_{\text{ND, KanSan}}} \cdot r_{\text{Z}} \right] ; \\ \text{wenn } \text{FöM}_{\text{Kan, RW, AK}(n, t)} - \text{FöM}_{\text{Kan, AK}(n, t)} \geq 0 \\ \\ 0 ; \text{ wenn } \text{FöM}_{\text{Kan, RW, AK}(n, t)} - \text{FöM}_{\text{Kan, AK}(n, t)} \leq 0 \end{cases} \quad (74)$$

$\text{FöM}_{\text{Kan, AK}}$	Fördermittelsumme Kanalnetz nach Altersklasse (<10a, <20a und <30a)	(€)
$\text{FöM}_{\text{Kan, RW, AK}}$	Restwert nicht verrechneter Kanalnetz Fördermittel	(€ a <sup>-1</sup> )

$$\text{FöM}_{\text{Kan, RW, AK}(n, t)} = \begin{cases} \left[ \frac{\text{FöM}_{\text{Kan, Ges}}}{L_{\text{AK} < 10a} + L_{\text{AK} < 20a} + L_{\text{AK} < 30a}} \cdot L_{\text{AK}(n)} \right]_{n=1}^3 ; \text{ wenn } t = 1 \\ \\ \left[ \text{FöM}_{\text{RW, Kan, AK}(n, t-1)} - \text{FöM}_{\text{Kan, AK}(n, t)} \right]_{n=1}^3 ; \text{ wenn } t > 1 \end{cases} \quad (75)$$
  

$\text{FöM}_{\text{Kan, Ges}}$	Fördermittelsumme Kanalnetz	(€)
$L_{\text{AK}}$	Leitungslängen in Altersklassen	(m)

$$FöM_{Kan,AK(n,t)} = \left[ \frac{FöM_{Kan,Ges}}{L_{AK<10a} + L_{AK<20a} + L_{AK<30a}} \cdot r_{KanSan} \cdot L_{AK(n,t)} \right]_{n=1}^3 \quad (76)$$

### Eigenkapitalverzinsung

Die Eigenkapitalzinsen sind Teil der kalkulatorischen Kosten und werden in der Vollkostenrechnung als Zusatzkosten angesetzt, um das eingesetzte Eigenkapital fiktiv zu verzinsen. Auf diese Weise wird der entgangene Zins des ins Unternehmen investierten Eigenkapitals in Form von Opportunitätskosten einer hypothetischen Kapitalanlage berücksichtigt. Eigenkapitalzinsen sind nicht als Aufwand (pagatorische Kosten) in der GuV enthalten und in der Handels- und Steuerbilanz nicht zulässig. Damit sind diese Kosten im externen handelsrechtlichen Jahresabschluss nicht enthalten, wirken sich aber dennoch auf das Betriebsergebnis durch die Einbeziehung der kalkulatorischen Kosten in der internen Preiskalkulation für die Produkte und Dienstleistungen aus (Franz 2005). Die Einbeziehung der Eigenkapitalzinsen in die Gebühr ist für die abgabenberechtigten Körperschaften, ihre Eigenbetriebe oder Eigengesellschaften im KAG der Bundesländer geregelt. In 13 Bundesländern (außer Hamburg, Berlin und Bremen) ist nach den KAG eine angemessene Eigenkapitalverzinsung zulässig. Die Auslegung der Angemessenheit obliegt in allen genannten Bundesländern, außer in Sachsen-Anhalt, den Kommunen, denen damit ein Handlungsspielraum entsteht. In Sachsen-Anhalt ist festgelegt, dass sich die Eigenkapitalverzinsung nach den Kommunalkreditzinsen zu erfolgen hat. Beim Großteil der Bundesländer erfolgt die Bemessung der kalkulatorischen Zinsen anhand der Abzugs-Restwertmethode. In M-V kann alternativ zudem die Auflösungs-Restwertmethode und die Durchschnittswertmethode angewandt und in Rheinland-Pfalz pauschal 1,6 % des Restbuchwertes vom Anlagevermögen angesetzt werden (KAG M-V, KAG RP, Holländer et al. 2008).

Beim gängigsten Berechnungsverfahren der Abzugs-Restwertmethode werden vom aufgewendeten Kapital zu Anschaffungs- und Herstellungskosten die Beiträge und Zuschüsse Dritter abgezogen und um die Abschreibungen vermindert. Grundsätzlich darf als Wertansatz nur auf Anschaffungs- und Herstellungskosten kalkuliert werden, denn prinzipiell sollte nur das tatsächlich eingesetzte Kapital verzinst werden. Dieses drückt sich allein im selbstfinanzierten Anschaffungswert aus (Franz 2005). Bei der Auflösungs-Restwertmethode werden die Beiträge und Zuschüsse Dritter anhand eines gewichteten Abschreibungssatzes vom Restwert des aufgewendeten Kapitals abgezogen. Die Durchschnittswertmethode berechnet die kalkulatorischen Zinsen vom halben Ausgangswert des aufgewendeten Kapitals und entspricht dem durchschnittlich im Unternehmen gebundenen Kapitals. Mittels dieser Methodik wird eine lineare Abschreibung über die gesamte Nutzungsdauer suggeriert. Somit bleiben, bei gleichen Ausgangswerten, die kalkulatorischen Zinsen über die Zeit konstant.

Hinsichtlich der Verbreitung wurde die Abzugs-Restwertmethode als Berechnungsgrundlage für die Eigenkapitalzinsen in das Modell aufgenommen. Zur Vereinfachung der Herleitung des betriebsnotwendigen Vermögens, besteht dieses im Modell nur aus dem für den Betrieb notwendigen Anlagevermögen. Aufgrund der Komplexität zur Bestimmung des betriebsnotwendigen Umlaufvermögens und dessen geringerem Anteil am betriebsnotwendigen Vermögen, wurde dieses in der Berechnung vernachlässigt. Durch die modellseitige Erfassung der Restbuchwerte in den jeweiligen Kostenstellen, sind die Sachanlagewerte bereits auf das betriebsnotwendige Anlagenvermögen

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

bereinigt. Folglich ergeben sich die Eigenkapitalzinsen im Modell vereinfacht gemäß (77) aus der Differenz des betriebsnotwendigen Anlagevermögens und dem Abzugskapital. Das Abzugskapital bildet sich aus den Beiträgen, Zuschüssen und Fremdkapital in Form von Verbindlichkeiten gegenüber Kreditinstituten. Aus der Summe resultiert das betriebsbedingte Eigenkapital, welches mit dem Eigenkapitalzinssatz verzinst wird.

$$K_{EKZ(t)} = \begin{cases} 0 \\ (RBW_{SWEN(t)} + RBW_{KA(t)} - B_{(t)} - FöM_{Ges(t)} - Kr_{Ges(t)}) \cdot r_{EKZ} \end{cases} \quad (77)$$

$RBW_{SWEN}$	Restbuchwerte SWEN	(€)
$RBW_{KA}$	Restbuchwerte KA	(€)
$B_{Ges}$	Beitragssumme	(€)
$FöM_{Ges}$	Fördermittelsumme gesamt	(€)
$Kr_{Ges}$	Verbindlichkeiten gesamt	(€)
$r_{EKZ}$	Eigenkapitalzinssatz	(-)

Der Eigenkapitalzinssatz wird für den Betrachtungszeitraum, in Analogie zum Darlehenszinssatz, als konstanter Wert angegeben. Bezüglich der in den KAG der Bundesländer geforderten angemessenen Verzinsung des Eigenkapitals sollte nach (DWA 2012b) eine Orientierung an den langfristigen Kommunalkreditbedingungen stattfinden. Neben der pauschalen Festlegung des Zinssatzes oder in Anlehnung an die Kommunalkreditzinssätze wäre auch eine Herleitung über eigens für den Kapitalmarkt entwickelte Modelle unter Berücksichtigung eines Wagnisaufschlages möglich. Hierfür gibt es zahlreiche Ansätze; gängige Verfahren sind das Discounted Cash-Flow (DCF) Verfahren, Capital Asset Pricing Modell (CAPM), Multiplikatoren CAPM, Dividend Growth Model (DGM) und das Fundament Beta Modell, um nur einige zu nennen. Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) sowie die Regulierungsbehörden von Infrastrukturbranchen in Europa empfehlen den CAPM-Ansatz (BDEW 2012). Dabei handelt es sich um ein statistisches Modell basierend auf der Portfoliotheorie, welches eine Prädiktion des nicht diversifizierbaren Risikos ermöglicht. Es beschreibt eine lineare Abhängigkeit der zu erwartenden Rendite einer Kapitalanlage von nur einer Risikoeinflussgröße (Ein-Faktor-Modell). Der risikoadjustierte Eigenkapitalzinssatz besteht gemäß Modellansatz aus einem Basiszinssatz (Verzinsung einer risikofreien Anlage) und einem branchenspezifischen Wagniszuschlag, welcher sich aus der Gewichtung (Beta-Faktor) der Risikoprämie des gesamten Aktienmarktes (Marktrisiko) mit dem Branchenrisiko ergibt (Fama und French 2004, Perold 2004, Warfsmann 1993). Nach BDEW (2012) existieren keine alternativen Ansätze, welche in adäquater quantifizierbarer Weise wie das CAPM einen sachgerechten Risikozuschlag ermitteln.

#### Sonstige Aufwendungen

In den sonstigen Aufwendungen sind sämtliche Kosten enthalten, die zum operativen Geschäft gehören, jedoch nicht den Kostenarten Personal- oder Materialaufwand zuzuordnen sind. Unter anderem gehören hierzu Mieten, Pachten, Reisekosten, Versicherungen, Bürobedarf, Bildungsmaterialien (Zeitschriften, Bücher), Werbungskosten, Leasing (KFZ, Computer), Softwarelizenzen, Rechts- und Beratungskosten. Auch die Abwasserabgabe ist dieser Kostenart zuzuordnen. Außer der

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Abwasserabgabe lassen sich die anderen Positionen dieser Kostenart nicht durch prozessbasierte Parameter herleiten, weshalb diese zusammengefasst betrachtet werden. Im Modell findet die Herleitung der sonstigen Aufwendungen gemäß (78) anhand der Unterteilung in einen Fixkosten- nach (79) und in einen variablen Kostenanteil (80) sowie der exkludierten Abwasserabgabe statt. Die fixen und variablen Kostenanteile ergeben sich mittels Faktoren aus dem Gesamtaufwand. Durch die separate Berechnung der Abwasserabgabe ist diese aus beiden Kostenanteilen herauszurechnen. Der Fixkostenanteil wird einmalig ermittelt, da dieser über den Betrachtungszeitraum, ausgehend vom Wert zum Betrachtungszeitpunkt ( $t=1$ ), unverändert bleibt. Dadurch bedingt erfolgt die Integration der Inflation über einen exponentiellen Anstieg über die Zeit. Der variable Kostenanteil wird mengenmäßig durch die Abwassermenge der Haushalte sowie des Gewerbes und der Industrie beeinflusst. Dieser Einfluss wird durch die jährliche Veränderungsrate bei den Kosten berücksichtigt. Basierend auf der Herleitung verändert sich mit dem Abwasseraufkommen der variable Kostenanteil über die Zeit. Die inflationären Einflüsse werden in der Herleitung des Jahreswertes direkt mit einbezogen. Beim Abgabesatz zur Kalkulation der Abwasserabgabe handelt es sich um einen konstanten Wert, welcher der Inflation nicht unterliegt, sondern gesetzlich in der AbwV festgeschrieben ist.

$$K_{sAw(t)} = K_{sAw,fix} \cdot (1 + r_{Inf})^t + K_{sAw,var(t)} + K_{AbwA} \quad (78)$$

$K_{sAw}$	Sonstige Aufwendungen	(€)
$K_{sAw,fix}$	Fixkostenanteil sonstige Aufwendungen	(€)
$K_{sAw,var}$	Variabler Kostenanteil sonstige Aufwendungen	(€)
$K_{AbwA}$	Abwasserabgabe	(€)

$$K_{sAw,fix} = f_{sAw,fix} \cdot (K_{sAw(1)} - K_{AbwA}) \quad (79)$$

$$f_{sAw,fix} \quad \text{Fixkostenanteilsfaktor sonstige Aufwendungen} \quad (-)$$

$$K_{sAw,var(t)} = \begin{cases} f_{sAw,var} \cdot (K_{sAw(1)} - K_{AbwA}) & ; \text{wenn } t = 1 \\ K_{sAw,var(t-1)} \cdot (1 - r_{Qa,EW(t)}) \cdot (1 + r_{Inf}); & \text{wenn } t > 1 \end{cases} \quad (80)$$

$f_{sAw,var}$	Faktor variabler Kostenanteil sonstige Aufwendungen	(-)
$r_{Qa,EW}$	Veränderungsrate häusliche und industrielle Abwassermenge	(-)

Das AbwAG sieht vor, dass für die Direkteinleitung von belastetem Abwasser in Gewässer eine Abgabe zu entrichten ist. Die Abgaben sind keine Steuern, es sind zweckgebundene Einnahmen, welche nach § 13 AbwAG der Förderung von Maßnahmen zur Erhaltung oder Verbesserung der Gewässergüte dienen. Ausgestaltet als Lenkungsabgabe mit der Absicht, finanzielle Anreize zu schaffen, die Leistungsfähigkeit von KA und Regenwasserbehandlungsanlagen zu verbessern und abwasserreduzierende Produktionsverfahren zu fördern, trägt die Abwasserabgabe zu einer Reduzierung der Schadstoffeinleitungen in Gewässer bei (Lenkungsfunktion) und regt gleichzeitig zu Investitionen im Bereich der Abwasserrwirtschaft an (Anreizfunktion). Dadurch, dass die Erhebung der Abgabe Ländersache ist, kommt diese den Ländern zu und ist von ihnen zweckgebunden zu verwenden. Der Lenkungszweck, welcher durch die Abwasserabgabe verfolgt wird, hängt von der konkreten Ausgestaltung ab. Erhoben wird die Abgabe für das Einleiten von Schmutzwasser,

Niederschlagswasser sowie für Kleineinleitungen (Direkteinleitungen kleiner  $8 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) von Schmutzwasser. Gemäß § 7 Abs. 2 AbwAG obliegt es den Ländern (durch Ausführungsgesetze in Form von Landesabwasserabgabengesetzen) für das Einleiten von Niederschlagswasser ganz oder teilweise eine Abgabe zu erheben oder diese als abgabefrei zu belassen. Abgabefrei bleiben auch in Zukunft Niederschlagswassereinleitungen bei Einhaltung der Anforderungen des Einleitungsbescheides und der technischen Anforderungen nach dem Stand der Technik (§ 114a WHG) sowie bei einem Ausbaugrad der Regenwasserbehandlung von mindestens 90 %. Seit 2002 beträgt gemäß § 9 Abs. 4 AbwAG der Abgabesatz je Schadeinheit 35,79 €. Für die Abwasserabgabe werden aus den modellseitig abgebildeten Stoffen (CSB, P, N) die Schadeinheiten abgeleitet. Nach (81) ergibt sich aus dem Produkt vom Abgabesatz und der Summe der Schadeinheiten die Abwasserabgabe. Da nur 3 von 11 Parametern prozessbasiert im Modell abgebildet werden, wird zur Berechnung der Abwasserabgabe die Differenz der Schadeinheiten der drei Stoffe zwischen den Jahren gebildet und diese mit dem Gesamtbetrag verrechnet. Im Umkehrschluss wird modellseitig die Annahme getroffen, dass die nicht betrachteten Parameter sich über die Zeit nicht verändern und die auf diese Parameter bezogene Abgabe gleichbleibt.

$$K_{sAw,AbwA(t)} = \begin{cases} K_{sAw,AbwA(1)} \\ K_{sAw,AbwA(t-1)} - \sum_{n=1}^3 (SE_{X(n,t-1)} - SE_{X(n,t)}) \cdot k_{AbwA} \end{cases} \quad (81)$$

$SE_X$   
 $k_{AbwA}$

Schadstoff-Schadeinheiten  
 Abwasserabgabensatz

$(-)$   
 $(\text{€ SE}^{-1})$

Nach § 9 Abs. 5 AbwAG erfolgt beim Einhalten der Grenzwerte des Anhang 1 der AbwV eine Ermäßigung des Abgabesatzes um 50 %. Häufig liegen bei Einleitungen aus kommunalen KA die Konzentrationen für AOX und Metallen die Konzentrationen unter den Schwellenwerten, worauf hin keine Abgabe für diese Schadstoffe zu zahlen wäre. Im Modell ist die Betrachtung eines Verstoßes nicht integriert. Es wird angenommen, dass die Grenzwerte eingehalten werden. Generell würde sich die Nichteinhaltung der abgaberelevanten Bescheidwerte in zweifacher Weise abgabeerhöhend auswirken. Einerseits würde sich gemäß § 4 Abs. 4 AbwAG die Zahl der Schadeinheiten erhöhen und zum anderen nach § 9 Abs. 5 AbwAG ggf. die Ermäßigung des Abgabensatzes entfallen. Bei Erklärung der Überwachungswerte nach § 6 Abs. 1 AbwAG, würden bei einer Überschreitung der ordnungsrechtlichen Einleitungswerte und Überwachungswerte lediglich abgaberechtliche Konsequenzen daraus resultieren.

## Abschreibungen

Abschreibungen dienen der Verrechnung von Wertminderungen des Anlage- und Umlaufvermögens. Wertminderungen erfolgen durch Alterung, Schäden, Abnutzung, Ablauf von Schutzrechten oder Nutzungsrechten etc. Voraussetzung für eine Abschreibung eines Wirtschaftsgutes (materiell oder immateriell) ist dessen zeitlich begrenzte Einsetzbarkeit. Basierend auf der Periode ihrer voraussichtlichen betrieblichen Nutzung (Nutzungsdauer) werden im Handelsrecht sowie im Steuerrecht die Anschaffungs- oder Herstellungskosten verteilt. Beim Handelsrecht liegen im Vergleich zum

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

---

Steuerrecht unterschiedliche Abschreibungsbestimmungen vor. Gemäß § 253 Abs. 1 Satz 1 HGB besteht eine Abschreibungspflicht, wobei die abzuschreibenden Vermögengegenstände nach § 253 Abs. 2 - 4 HGB definiert sind. Die Wertminderung ist in die Bilanz sowie in der GuV aufzuführen. Durch die Berücksichtigung der tatsächlichen Wertverhältnisse wird die Bilanzklarheit hergestellt. Nach dem Einkommensteuergesetz (EStG) werden Abschreibungen gemäß § 7 EStG als Absetzung für Abnutzung (AfA) bezeichnet. In den sogenannten AfA-Tabellen werden vom Bundesministerium für Finanzen die voraussichtlichen Nutzungsdauern vorgegeben. Im handelsrechtlichen und steuerrechtlichen wird zwischen planmäßigen und außerplanmäßigen Abschreibungen unterschieden. Planmäßige Abschreibungen basieren auf im Nutzungsplan festgelegten Nutzungsdauern und einer jeweils verwendeten Abschreibungsmethode. Außerplanmäßige Abschreibungen bzw. Sonderabschreibungen dienen dem Ausgleich von unerwartet eingetretenem Wertverzehr durch Preisverfall, Überalterung, Zerstörung oder gesunkenen Wiederbeschaffungskosten, welche zu einem niedrigeren Buchwert führen als zuvor bemessen wurde. Im Steuerrecht wird diese Art der Abschreibung als Absetzung für außergewöhnliche Abnutzung (AfAa) bezeichnet. Planmäßige Abschreibungen werden in zeitproportionale, leistungsproportionale und Substanzwertabschreibungen unterteilt. Zur Berechnung der jährlichen (zeitproportionalen) Abschreibungsbeträge existieren folgende Abschreibungsmethoden: Linear, degressiv und progressiv. Das Handelsrecht weist im Vergleich zum Steuerrecht keine Vorschriften bezüglich der zu verwendenden Methoden auf, doch hat die gewählte Methode den Grundsätzen der ordnungsmäßigen Buchführung zu entsprechen. Das Steuerrecht gibt hingegen genau an, welche zulässig sind. In den Standards der staatlichen doppelten Buchführung als auch in den KAG der Bundesländer, außer in Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland und Saarland ist verankert, dass Abschreibungen linear (gleichmäßig über die Nutzungsdauer verteilt) zu bemessen sind. In den genannten Bundesländern ist die Abschreibungsart entweder nicht genauer definiert oder sind optional degressive Abschreibungen möglich (Rehm und Matern-Rehm 2010). Nach DWA-A-133 (2005) sollten Abschreibungen auf Abwasseranlagen jedoch linear erfolgen. Im Gegensatz zu den pagatorischen Abschreibungen nach Handels- und Steuerrecht kann, außer in den bereits genannten Bundesländern, zur Veranlagung der Gebühren aus besonderen wirtschaftlichen Gründen der Wiederbeschaffungszeitwert zur Berechnung der kalkulatorischen Abschreibungen herangezogen werden (Rehm und Matern-Rehm 2010, Wittling 1996). Durch Ermittlung des verursachungsgerechten Werteverzehrs bei den kalkulatorischen Abschreibungen wird der Substanzerhalt gewährleistet, mit dem Ziel, dass zum Nutzungsende das erforderliche Kapital für die Erneuerung der Anlage zur Verfügung steht. Dabei ist der auf die kalkulatorische Abschreibung entfallende Abwassergebührenanteil zweckgebunden und der Aufgabenträger hat nach Ende der Nutzungsdauer sicherzustellen, dass dieser Betrag zur Verfügung steht. Das Ansetzen des Wiederbeschaffungszeitwertes kann im Vergleich zu den Anschaffungs-/Herstellungskosten zu mehr als einer Verdoppelung des Anlagevermögens und der Abschreibungen führen (Wittling 1996). Anders als bei den Abschreibungen des Handels- und Steuerrechts werden die kalkulatorischen Abschreibungen bis zum Ende der tatsächlichen betrieblichen Nutzung (Zeitpunkt an dem die Anlage außer Dienst gestellt wird) fortgeführt. Der Abschreibungszeitraum kann diesbezüglich länger oder kürzer als die steuerliche Frist sein. Kalkulatorische Abschreibungen werden allgemein den betriebswirtschaftlich ansatzfähigen Kosten der unternehmensinternen Kostenrechnung zugeordnet und erscheinen nicht in der Buchführung.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Gemäß den Bestimmungen der meisten KAG ist im Modell die lineare Abschreibungsmethode integriert. Für die Gebührenermittlung kann modellseitig optional zwischen der Abschreibungs-ermittlung basierend auf den Anschaffungs- und Herstellungskosten oder dem Wiederbeschaffungs-zeitwert gewählt werden. Die Gesamtabschreibungssumme bildet sich nach (82) aus den Summen der einzelnen Abschreibungen aus den Kostenstellen.

$$K_{A(t)} = K_{A,V(t)} + K_{A,KA(t)} + K_{A,SWEN(t)} \quad (82)$$

$K_A$	Abschreibungen (gesamt)	(€)
$K_{A,V}$	Abschreibungen Kostenstelle Verwaltung	(€)
$K_{A,KA}$	Abschreibungen Kostenstelle KA	(€)
$K_{A,SWEN}$	Abschreibungen Kostenstelle SWEN	(€)

Die linearen Abschreibungen lassen sich für die Verwaltung nach (83), für die Behandlungsanlagen nach (86) und für das Kanalnetz nach (87) ermitteln. In den Abschreibungen der Verwaltung ist sämtliches Sachanlagevermögen enthalten, welches weder den Behandlungsanlagen noch dem Kanalnetz zuzuordnen ist. Für das Modell gilt die Annahme, dass die Sachanlagewerte in der Anzahl gleichbleiben und sich ausschließlich der Sachanlagewert durch inflationäre Einflüsse verändert. Deren Abschreibungen resultieren in Abhängigkeit vom zu Grunde gelegten Basiswert (Anschaffungs-/ Herstellungskosten oder Wiederbeschaffungsneuwert) aus der Differenz zwischen den neuverbuchten Abschreibungen nach (84) und der Abschreibungsablösung aus dem vorherigen Nutzungszeitraum gemäß (85). Die Ermittlung der Wiederbeschaffungskosten erfolgt entweder über Erfahrungswerte oder kann anhand der mittleren Inflationsrate abgeleitet werden. In der Regel wird bei der Berechnung der kalkulatorischen Abschreibungen der sogenannte Schrott- bzw. Restwert der Anlage vom Wiederbeschaffungszeitwert abgezogen. Der Schrottwert gibt den Wert der Anlage nach Ende ihrer tatsächlichen Nutzung an. Bezogen auf die Anlagen in der Abwasserwirtschaft, welche bei Erneuerung eher Kosten durch Abriss verursachen, wurde der Schrottwert für die Herleitung der kalkulatorischen Abschreibungen vernachlässigt. Bei der Herleitung der Abschreibungsablösung findet bei angesetzten Anschaffungs-/ Herstellungskosten als Basiswert, wenn der Zeitpunkt der Investition vor dem Bezugsjahr liegt, eine Abpreisung oder, wenn der Zeitpunkt bereits im Prognosezeitraum liegt, eine Aufpreisung, statt. Bei Ansetzung des Wiederbeschaffungsneuwertes werden die aktuellen Kosten des gegenwärtigen Investitionszeitpunktes zugrunde gelegt, da sich in der vorherigen Investitionsperiode dieser Betrag als Wiederbeschaffungsneuwert hätte ergeben müssen. Aufgrund der unbestimmten aggregierten Sachanlagenwerte wird die voraussichtliche betriebliche Nutzungsdauer pauschalisiert und als Mittelwert für die Sachanlagenwerte angegeben.

$$K_{A,V(t)} = K_{A,V,SW(t)} - K_{AA,V,SW(t)} \quad (83)$$

$K_{A,V,SW}$	Abschreibung Verwaltungssachanlagewerte	(€)
$K_{AA,V,SW}$	Ablösung Abschreibung Verwaltungssachanlagewerte	(€)

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

$$K_{A,V,SW(t)} = \begin{cases} \frac{K_{V,SW(1)}}{t_{ND,SWV}} & ; \text{wenn } t = 1 \\ K_{A,V,SW(t-1)} & ; \text{wenn } t > 1 \wedge \bar{t}_{V,SW} \neq t_{ND,V,SW} \\ \frac{K_{V,SW(t-1)}}{t_{ND,V,SW}} \cdot (1 + r_{Inf})^t & ; \text{wenn } t > 1 \wedge \bar{t}_{V,SW} = t_{ND,V,SW} \wedge \neg \text{WBNW} \\ \frac{K_{V,SW(t-1)}}{t_{ND,V,SW}} \cdot (1 + r_{Inf})^{(t+t_{ND,V,SW})} & ; \text{wenn } t > 1 \wedge \bar{t}_{V,SW} = t_{ND,V,SW} \wedge \text{WBNW} \end{cases} \quad (84)$$

$K_{V,SW}$	Sachanlagewerte Verwaltung	(€)
$t_{ND,V,SW}$	Nutzungsdauer Sachanlagewerte Verwaltung	(a)
$\bar{t}_{V,SW}$	Durchschnittliches Sachanlagenalter	(a)

$$K_{AA,V,SW(t)} = \begin{cases} 0 & ; \text{wenn } \bar{t}_{V,SW} \neq t_{ND,V,SW} \\ \frac{K_{V,SW(t-1)}}{t_{ND,V,SW}} \cdot \frac{1}{(1 + r_{Inf,VB})^{(t_{ND,SWV}-t)}} & ; \\ \text{wenn } \bar{t}_{V,SW} = t_{ND,V,SW} \wedge t_{ND,V,SW} - t < 0 \wedge \neg \text{WBNW} \\ \frac{K_{V,SW(t-1)}}{t_{ND,V,SW}} \cdot (1 + r_{Inf})^t & ; \text{wenn } \bar{t}_{V,SW} = t_{ND,V,SW} \wedge t_{ND,V,SW} - t \geq 0 \wedge \neg \text{WBNW} \\ \frac{K_{V,SW(t-1)}}{t_{ND,V,SW}} \cdot (1 + r_{Inf})^t & ; \text{wenn } \bar{t}_{V,SW} = t_{ND,V,SW} \wedge \text{WBNW} \end{cases} \quad (85)$$

$r_{Inf,VB}$       Inflationsrate vor Betrachtungszeitraum      (-)

Die Herleitung der Abschreibungen für die KA findet, begründet im Rechenalgorithmus, überwiegend im Modul *KA* statt. Im Modul *KGK* werden die Abschreibungen unter Berücksichtigung der optionalen Berechnungsgrundlagen der einzelnen Komponenten aufsummiert und die Differenz zwischen dem Abschreibungsbetrag der Reinvestition und dem vorherigen Abschreibungsbetrag zur Verrechnung mit dem Vorjahreswert gebildet.

$$K_{A,KA(t)} = \begin{cases} K_{A,KA(1)} & ; \text{wenn } t = 1 \\ K_{A,KA(t-1)} & ; \text{wenn } t > 1 \wedge t_{KA(n,t)} \neq t_{ND,KA(n)} \\ K_{A,KA(t-1)} + \sum_{i=1}^n (K_{A,KAn(n,t)} - K_{AA,KAn(n,t)}) & ; \text{wenn } t > 1 \wedge t_{KA(n,t)} = t_{ND,KA(n)} \end{cases} \quad (86)$$

$K_{A,KAn}$	Abschreibung KA-Komponente	(€)
$K_{AA,KAn}$	Ablösung Abschreibung KA-Komponenten	(-)

Für die Berechnung der Abschreibungen, welche sich aus den Erneuerungen und Renovierungen des Kanalnetzes sowie aus den Neuerschließungen ergeben, werden vom Modul *SWEN* die Informationen über die in den Altersklassen befindlichen Kanalkilometer übergeben. Anhand dieser Informationen



#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

lässt sich das Ende der Abschreibungen für die entsprechenden Kanalanteile bestimmen. Die Abschreibungen für die Kostenstelle Kanalnetz resultieren modellseitig gemäß (87) aus der Abschreibung erneuerter Leitungslängen, dem Austrag von bereits abgeschriebenen Leitungslängen und den Neuerschließungen. Leitungslängen neuerschlossener Gebiete werden nach dem Buchungsjahr unter den Abschreibungen des SWEN fortgeführt.

$$K_{A,SWEN(t)} = \begin{cases} K_{A,SWEN(1)} & ; \text{wenn } t = 1 \\ K_{A,SWEN(t-1)} + K_{A,KanSan(t)} - K_{AA,KanSan(t)} + K_{A,KanNeu(t)} & ; \text{wenn } t > 1 \end{cases} \quad (87)$$

$K_{A,KanSan}$	Abschreibung Kanalerneuerungen und -renovierung	(€)
$K_{AA,KanSan}$	Ablösung Abschreibungen	(€)
$K_{A,KanNeu}$	Abschreibungen Neuerschließungen	(€)

Renovierungsmaßnahmen beziehen sich auf die gesamte Haltung und dienen der Verbesserung der Funktionalität. Grundsätzlich können Renovierungen als Erhaltungsaufwand oder Investition angesetzt werden. Bei Erneuerungsmaßnahmen übernehmen die neuen Anlagen die Funktion der ursprünglichen Kanäle bzw. Leitungen und sind als Investition zu verbuchen. Durch die modellseitige Zusammenlegung der beiden Sanierungsformen wird verallgemeinert, dass sämtliche Maßnahmen den Investitionen zuzuordnen sind. Bei gleichmäßiger Verteilung über die repräsentative Nutzungsdauer und Berücksichtigung der Inflation berechnen sich die Abschreibungen für Kanalerneuerung und -renovierung in Abhängigkeit vom zugrunde gelegten Basiswert nach (88) über die Gesamtlänge des SWEN, der über den Prognosezeitraum festgelegten Sanierungsquote und den spezifischen Kanalsanierungskosten. Die Inflation wird in Abhängigkeit des angesetzten Ausgangswertes (Anschaffungs-/ Herstellungskosten oder Wiederbeschaffungsneuwert) ermittelt. Dabei findet ausschließlich eine Aufpreisung vom Ausgangswert der längenspezifischen Kanalsanierungskosten statt. Die Reduktion der Abschreibungssumme des SWEN erfolgt nach (89) durch die Ablösung von Abschreibungen von Kanallängen, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt komplett abgeschrieben sind. Zur Ermittlung des Ausgangswertes des abzulösenden Betrags findet beim Ansetzen der Anschaffungs-/ Herstellungskosten in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der vorherigen Investition eine Auf- oder Abpreisung der Kosten statt. Beim Ansetzen des Wiederbeschaffungsneuwertes werden die zum Zeitpunkt aktuellen Kosten für die Abschreibungsablösung zugrunde gelegt.

$$K_{A,KanSan(t)} = \begin{cases} \frac{L_{Ges(t)} \cdot r_{KanSan} \cdot k_{KanSan,spez}}{t_{ND,KanSan}} \cdot (1 + r_{Inf})^t & ; \text{wenn } r\text{-WBNW} \\ \frac{L_{Ges(t)} \cdot r_{KanSan} \cdot k_{KanSan,spez}}{t_{ND,KanSan}} \cdot (1 + r_{Inf})^{(t+t_{ND,KanSan})} & ; \text{wenn WBNW} \end{cases} \quad (88)$$

$L_{Ges}$	Gesamtlänge SWEN	(m)
$r_{KanSan}$	Kanalsanierungsquote (bezogen auf Erneuerung und Renovierung)	(-)
$k_{KanSan,spez}$	Längenspezifische Kanalsanierungskosten	(€ m <sup>-1</sup> )
$t_{ND,KanSan}$	Nutzungsdauer erneuerter und sanierter Leitungen	(-)

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

$$K_{AA,KanSan(t)} = \begin{cases} \frac{\left( L_{Ges(t)} \cdot r_{KanSan} + \frac{\Delta L_{AK,56(t)}}{10} \right) \cdot k_{KanSan,spez}}{t_{ND,KanSan}} \cdot \frac{1}{(1 + r_{Inf,VB})^{(t_{ND,KanSan}-t)}} ; \\ \text{wenn } t - t_{ND,KanSan} < 0 \wedge \neg \text{WBWW} \\ \frac{\left( L_{Ges(t)} \cdot r_{KanSan} + \frac{\Delta L_{AK,56(t)}}{10} \right) \cdot k_{KanSan,spez}}{t_{ND,KanSan}} \cdot (1 + r_{Inf})^{(t-t_{ND,KanSan})} ; \\ \text{wenn } t - t_{ND,KanSan} \geq 0 \wedge \neg \text{WBWW} \\ \frac{\left( L_{Ges(t)} \cdot r_{KanSan} + \frac{\Delta L_{AK,56(t)}}{10} \right) \cdot k_{KanSan,spez}}{t_{ND,KanSan}} \cdot (1 + r_{Inf})^t ; \\ \text{wenn } t - t_{ND,KanSan} \geq 0 \wedge \text{WBWW} \end{cases} \quad (89)$$

$\Delta L_{AK,56}$       Übergang AK 5 (<50 a) zu AK 6 (>50 a)      (m)

Grundsätzlich soll die Nutzungsdauer von erneuerten und neu gebauten Leitungen nach den Vorgaben der Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) gleich sein. Durch die separate Betrachtung von Kanalsanierung (Kanalerneuerung und -renovierung) und Neuerschließung werden bei ggf. unterschiedlich gewählten Nutzungsdauern die Anforderungen für eine repräsentative Abschreibungsberechnung im Bereich Kanalnetz gewährleistet. Für die Herleitung eines neuen Abschreibungsbetrages beim Neubau von Leitungen ist gemäß (90) der angesetzte Basiswert für die Abschreibungen zu berücksichtigen.

$$K_{A,KanNeu(t)} = \begin{cases} \frac{L_{Kan,Ges(t)} \cdot r_{KanNeu} \cdot k_{KanNeu,spez} \cdot (1 + r_{Inf})^t}{t_{ND,KanNeu}} ; \text{ wenn } \neg \text{WBWW} \\ \frac{L_{Kan,Ges(t)} \cdot r_{KanNeu} \cdot k_{KanNeu,spez} \cdot (1 + r_{Inf})^{(t+t_{ND,KanNeu})}}{t_{ND,KanNeu}} ; \text{ wenn WBWW} \end{cases} \quad (90)$$

$k_{KanNeu,spez}$	Längenspezifische Kanalneuerschließungskosten	(€ m <sup>-1</sup> )
$r_{KanNeu}$	Neuerschließungsquote	(-)
$t_{ND,KanNeu}$	Nutzungsdauer neuer Leitungen	(-)

#### Ertrag durch den Verkauf von elektrischer Energie

Im Modell findet an KA-Standorten mit anaerober Schlammstabilisierung mit einer Faulgasverwertung eine Netzeinspeisung von überschüssiger elektrischer Energie statt. Der Ertrag aus dem Verkauf dieser elektrischen Energiemenge berechnet sich nach (91) aus dem Vergütungspreis, welcher sich in Abhängigkeit von der Energiebilanz der Anlage und deren Eigenverbrauch entweder aus der Umlage des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG) oder des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes (KWKG) bzw. dem Spot-Marktpreis der Strombörse ergibt (Simon et al. 2017, Gretzschel et al. 2011). Aufgrund der politisch und energiewirtschaftlich schwer prognostizierbaren Entwicklung des Förderrahmens und des Strompreises wird der Vergütungspreis über den Betrachtungszeitraum der Simulation als konstant angenommen.

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

$$Er_{NE(t)} = \sum_{n=1}^n E_{el,NE(n,t)} \cdot P_{kWh,NE} \quad (91)$$

$$\begin{array}{ll} Er_{NE} & \text{Ertrag Energieeinspeisung} \quad (\text{€}) \\ P_{kWh,NE} & \text{Vergütungspreis Netzeinspeisung} \quad (\text{€ kWh}^{-1}) \end{array}$$

Die EEG- und KWKG-Umlagen werden grundsätzlich von allen Stromverbrauchern gezahlt, sie sind im Strompreis inkludiert. Der Anteil der EEG-Umlage vom Strompreis beträgt für 2018 mit 6,792 ct kWh<sup>-1</sup> 22,7 % und von der KWK-Umlage mit 0,345 ct kWh<sup>-1</sup> 1,2 % (Bundesnetzagentur 2018). Für Betreiber von EEG- oder KWK-Anlagen existieren nach § 8 EEG und § 4 KWKG dieselben vorrangigen gesetzlichen Anschluss- und Abnahmepflichten in Bezug auf die eingespeiste elektrische Energie.

Anhand der EEG-Umlage findet in Deutschland im Interesse des Klima- und Umweltschutzes die Finanzierung des Ausbaus der erneuerbaren Energien statt, mit den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgung, Verringerung der volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch Einbeziehung langfristiger externer Effekte, Schonung der fossilen Energieressourcen und Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien (§1 EEG). Für die Einspeisung in das öffentliche Versorgungsnetz erhalten Betreiber von Erneuerbare Energien (EE)-Anlagen einen festgelegten Zuschlag, welcher für Klärgas bei einer Bemessungsleistung bis 500 kW 6,49 ct kWh<sup>-1</sup> und bis 5 MW 5,66 ct kWh<sup>-1</sup> sowie für Biogas (Vergärung aus Co-Substraten) bis 500 kW 14,88 ct kWh<sup>-1</sup> und bis 20 MW 13,05 ct kWh<sup>-1</sup> beträgt. Grundsätzlich ist nach § 61 EEG für die selbsterzeugte und auch für die selbstverbrauchte elektrische Energiemenge die EEG-Umlage zu entrichten. Bestandsanlagen, welche nach den § 61c oder § 61d EEG unter den Bestandsschutz fallen, sind hiervon befreit. Die Dauer der Vergütung beträgt 20 Jahre.

Durch das KWKG wird in Deutschland im Interesse der Energieeinsparung sowie des Umwelt- und Klimaschutzes die Finanzierung zur Erhaltung, Modernisierung und den Ausbau der KWK-Anlagen geregelt, mit dem Ziel der Erhöhung der Nettostromerzeugung aus KWK-Anlagen (Blockheizkraftwerke und Heizkraftwerke) auf 110 TWh bis zum Jahr 2020 sowie auf 120 TWh bis zum Jahr 2025 (§ 1 KWKG). Seit der Novellierung der KWKG 2016 ist nach § 6 Abs. 1 und Abs. 4 KWKG wie beim EEG ausschließlich die elektrische Energiemenge mittels des KWK-Zuschlags förderfähig, welche in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist wird. Die eigenverbrauchte Energiemenge erhält somit seit der Novellierung keine Förderung mehr. Ausgenommen sind nach § 6 Abs. 3 hiervon Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis 100 kW und Anlagen, welche noch nach dem KWKG 2012 gefördert werden. Anlagenbetreiber erhalten in Abhängigkeit vom KWK-Leistungsanteil, welcher von <50 kW bis >2 MW gestaffelt ist, zwischen 3,1 und 8,0 ct kWh<sup>-1</sup>. Die Vergütungsdauer beträgt zwischen 6 bis 10 Jahren.

Für die Ertragskalkulation im Modell ist bei mehreren Anlagen mit unterschiedlichen Zuschlägen bzw. Vergütungspreisen ein Durchschnittspreis zu bilden, welcher für alle betreffenden KA übertragen wird. Neben den kleineren Erträgen aus der Netzeinspeisung ergeben sich weitere aus der Auflösung von Beiträgen und Zuschüssen sowie durch die Erhebung der Gebühren zur Deckung sämtlicher Kosten.

##### **Erhebung und Auflösung von Beiträgen**

Beiträge sind einmalige Entgelte Nutzungsberechtigter, welche aufgrund von allgemeinen Versorgungsbedingungen oder Satzungen erhoben werden. Im Fall der Anschlussbeiträge, dienen diese gemäß KAG der Bundesländer zur Deckung des Aufwandes zur Anschaffung und Herstellung notwendiger öffentlicher Einrichtungen zur leitungsgebundenen Versorgung mit Wasser, Wärme oder zur Entsorgung des Abwassers. Zwar besteht bei vorhandener zentraler Abwasserentsorgung ein sogenannter Anschlusszwang, es obliegt jedoch den Kommunen ob diese über eine Beitragssatzung Beiträge erheben. Die Erhebung kann nach dem Grundsatz der Einmaligkeit in den meisten Bundesländern (außer in Rheinland-Pfalz, Sachsen und Thüringen) nur einmalig erfolgen. Als Ausgangswert für die Beitragskalkulation ist der Investitionsaufwand für die gesamte Abwasserbeseitigungsanlage mittels Schätzungen und Prognosen festzustellen. Dabei wird im rechtlichen Sinne unter Abwasserbeseitigungsanlage ein Gesamtsystem verstanden, mit dessen Hilfe das Abwasser entwässert, behandelt und entsorgt wird. Der ermittelte Investitionsaufwand bezieht sich auf den Zeitpunkt des Satzungserlasses, weshalb spätere und nicht vorhergesehene Entwicklungen keinen Einfluss auf die Beitragskalkulation haben. Durch die Erhebung eines Beitrages besteht eine verbindliche Verpflichtung zur Beitragszahlung, doch werden dem Beitragspflichtigen als Gegenleistung durch die Möglichkeit der Inanspruchnahme Vorteile geboten. Das erhobene Beitragsaufkommen darf den festgelegten Investitionsaufwand nicht überschreiten (DWA 2012b).

Beim Beitragsaufkommen handelt es sich nicht um Eigenkapital des Aufgabenträgers und wegen der fehlenden Rückzahlungspflicht auch um keinen Kredit. Wegen dieser Besonderheit werden Beiträge als eigenständiges Finanzierungsinstrument betrachtet und gemäß der Eigenverordnung der Bundesländer (EigVO) als Sonderposten passiviert und über die Nutzungsdauer bzw. Restnutzungsdauer des damit finanzierten Sachanlagewertes ergebniswirksam aufgelöst. Die Ermittlung des Bemessungsaufwandes für die Berechnung der Beitragshöhe hat nach KAG der Bundesländer nach den tatsächlich entstandenen und voraussichtlich zu erwartenden Kosten abzüglich der Zuschüsse Dritter zu erfolgen. Für die Herleitung der Beitragshöhe kann als Berechnungsansatz entweder die Globalkalkulation, bei welcher der Sachanlagenbestand als eine Einrichtung betrachtet wird oder die Rechnungsperiodenkalkulation, bei welcher der repräsentative Anteil der gesamten öffentlichen Einrichtung auf die zeitlich als auch vom Bauumfang bevorteilten Grundstücke berechnet wird, angewendet werden. Grundsätzlich hat der Berechnungsmaßstab grundstücksbezogen zu sein, wobei ein erhöhter Gebrauchswert des Grundstücks zu berücksichtigen ist. Gängige Beitragsmaßstäbe sind die Grundstücksfläche, Gebäudefläche, Geschossfläche und Nutzungsfläche. Ältere Maßstäbe wie z.B. Frontlänge des Gebäudes oder Grundstücks, Bauwert, Frontmeterzuschlag oder Gebäudeversicherungsanschlag sind nicht mehr zulässig. Der ermittelte Beitragssatz ist einheitlich auf alle Grundstücke anzuwenden und wird in der Satzung festgeschrieben.

Liegt eine Beitragssatzung beim betrachteten Aufgabenträger vor, erfolgt für neuerschlossene Flächen eine Fortführung der Beitragserhebung. Die Beitragskalkulation für neuerschlossene Flächen erfolgt im Modell nach (92) entweder durch die Angabe des Beitragssatzes oder anhand der integrierten Beitragskalkulation. Für die Herleitung des Beitragssatzes wird der Quotient aus den, um die

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Zuschüsse bereinigten Anschaffungs- und Herstellungskosten (KA und SWEN) und dem grundstücksbezogenen Bemessungsmaßstab gebildet. Aus dem Produkt des Beitragssatzes und dem grundstückbezogenen Bemessungsmaßstab, unter Berücksichtigung neuerschlossener Flächen, ergibt sich nach (93) die für das Jahr zu erhebenden Beiträge.

$$B_S = \left\{ \frac{B_S}{AHK_{KA,Ges} + AHK_{SWEN,Ges} - FöM_{KA,Ges} - FöM_{SWEN,Ges}} \cdot A_G \right\} \quad (92)$$

$B_S$	Beitragssatz	€ m <sup>-2</sup>
$AHK_{KA,Ges}$	Anschaffungs- und Herstellungskosten KA	(€)
$AHK_{SWEN,Ges}$	Anschaffungs- und Herstellungskosten SWEN	(€)
$FöM_{KA,Ges}$	Fördermittelsumme KA gesamt	(€)
$FöM_{SWEN,Ges}$	Fördermittelsumme SWEN gesamt	(€)
$A_G$	Grundstücksbezogener Bemessungsmaßstab	(m <sup>2</sup> )

$$B_{E(t)} = B_S \cdot A_G \cdot (1 + r_{Kan,Neu}) \quad (93)$$

$B_E$	Beitragserhebung	(€)
$r_{Kan,Neu}$	Neuerschließungsquote	(-)

Die Auflösung der Beiträge erfolgt im Modell vereinfachend mittels einer gewichteten mittleren Nutzungsdauer aller Anlagen. Der aktuelle Restbuchwert der aufzulösenden Beitragssumme resultiert nach (94) aus dem Abzug des Auflösungsbetrages, welcher sich gemäß (95) aus dem Quotienten des erhobenen Beitrags und der mittleren Nutzungsdauer (zwischen 30 und 50 Jahren) ergibt und der Ergänzung durch ggf. neue Beitragserhebungen bei Neuerschließungen.

$$B_{RBW} = \begin{cases} B_{RBW(1)} \\ B_{RBW(t-1)} - B_{A(t)} + B_{E(t)} \end{cases} \quad (94)$$

$B_{RBW}$	Restbuchwert der Beitragssumme	(€)
-----------	--------------------------------	-----

$$B_{A(t)} = B_{A(t-1)} + \frac{B_{E(t)}}{t_{BA}} \quad (95)$$

$B_A$	Auflösungssumme Beiträge	(€)
$t_{BA}$	Zeitraum Beitragsauflösung	(-)

Ist die Summe für Erschließungsbeiträge aufgelöst und dementsprechend der Restwert aufgezehrt, entfällt der gebührenmindernde Anteil in der Gebührenkalkulation. In Abhängigkeit von der Höhe des Auflösungsbetrages kann dies zu einer sofortigen Gebührenerhöhung führen.

#### Auflösung von Investitionszuschüssen und Fördermittel

Nach EigVO und Gemeindehaushaltsverordnung (GemHVO-Doppik) der Bundesländer sind Investitionszuschüsse als Passivposten auszuweisen. Äquivalent zu den Beiträgen ist auch dieser Sonderposten über die Restnutzungsdauer des damit finanzierten Vermögensgegenstandes ergebniswirksam aufzulösen. Zu den Investitionszuschüssen gehören Geldleistungen, welche der Finanzierung

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

von Baumaßnahmen, dem Erwerb von beweglichen und unbeweglichen Vermögenswerten dienen sowie andere Auszahlungen und Investitionsfördermaßnahmen. Die Auflösungsdauer bei Fördermitteln oder Investitionszuschüssen ergibt sich aus der zeitlichen Bindung des Zuwendungsbescheides. Ohne zeitliche Vorgaben ist i.d.R. eine Auflösungsdauer zwischen 20 und 25 Jahren anzusetzen.

Im Zuge der zukünftigen Veränderungen in der Förderlandschaft als auch der schwierigen Abschätzung von möglichen Zuschüssen bzw. Fördermitteln, blieb der weitere Erhalt von Zuschüssen und Fördermitteln im Modell bei der Simulation des Betrachtungszeitraumes unberücksichtigt. Die bis zum Bezugsjahr erhaltenen Investitionszuschüsse und Fördermittel werden berücksichtigt und über den Betrachtungszeitraum als Restbuchwert nach (96) aufgelöst. Der Restbuchwert setzt sich zusammen aus den Zuschüssen für KA und für SWEN. Nach (97) erfolgt die Bestimmung des Auflösungsbetrages direkt durch Angabe oder mittels Herleitung als Quotient aus den Investitions-/Fördermittelsummen und der Auflösungsdauer.

$$FöM_{RBW(t)} = \begin{cases} FöM_{RBW(1)} \\ FöM_{RBW(t-1)} - FöM_A \end{cases} \quad (96)$$

$FöM_{RBW}$	Restbuchwert Fördermittel	(€)
$FöM_A$	Auflösungsbetrag Investitionszuschüsse	(€)

$$FöM_A = \begin{cases} FöM_A ; \text{wenn } FöM_A \\ \frac{FöM_{KA,Ges} + FöM_{SWEN,Ges}}{t_{FöM}} ; \text{wenn } \neg FöM_A \end{cases} \quad (97)$$

$FöM_{KA,Ges}$	Fördermittel KA gesamt	(€)
$FöM_{SWEN,Ges}$	Fördermittel SWEN gesamt	(€)
$t_{FöM}$	Zeitraum für Auflösung der Fördermittel	(-)

Sind die Zuschuss-/ Fördermittelsummen aufgelöst und der Restbuchwert aufgezehrt, entfällt der gebührenmindernde Anteil in der Gebührenkalkulation.

#### Gebührenkalkulation

Abwassergebühren sind Kommunalabgaben und dementsprechend ist deren Definition, Berechnungsansatz sowie deren Erlass im KAG der Bundesländer enthalten und geregelt. Nach KAG handelt es sich dabei um sogenannte Benutzungsgebühren, welche für die Inanspruchnahme der öffentlichen Abwasserbeseitigungseinrichtung zu erheben sind. Die Abwassergebühren werden über die Gebührensatzung der Kommunen erhoben. Bei der Ausgestaltung der Gebührensatzung ist die Einhaltung des Gleichbehandlungsprinzips, Äquivalenzprinzips und Kostendeckungsprinzips zu gewährleisten (DWA 2012b).

Gemäß dem Gleichbehandlungsprinzip (nach § 3 GG) sind die Benutzer entsprechend dem Ausmaß der Nutzung zu belasten. Gestaltungsfreiheiten sind dem Satzungsgeber im Abgabenrecht jedoch vorbehalten. Beim Äquivalenzprinzip handelt es sich um den auf Verfassungsrecht beruhenden bundesrechtlichen Grundsatz der Verhältnismäßigkeit. Diesbezüglich darf die Gebühr in keiner offensichtlichen Diskrepanz zur erbrachten Leistung stehen (DWA 2012b, Quaas 1997). Des Weiteren

ist das Kostendeckungsprinzip mit dem integrierten Kostenüberschreitungsverbot (Kostenkalkulationsobergrenze) und dem Kostendeckungsgebot (Kostenkalkulationsuntergrenze) einzuhalten. In Folge dessen sollte das Gebührenaufkommen die nach betriebswirtschaftlichen Grundsätzen ansatzfähigen Kosten decken, aber auch nicht überschreiten. In Bezug auf dieses Prinzip ist im Bereich der Abwasserbeseitigung eine Gewinnerzielung bzw. Gewinnerzielungsabsicht ausgeschlossen. Das Kostenüberschreitungsverbot ist in den KAG der Bundesländer entweder als ausdrückliches Verbot gekennzeichnet oder als Soll-Vorschrift zum zwingenden Ausgleich der Überdeckungen verankert. Bei der sogenannten Kostenausgleichsvariante werden die Kostenüber- und -unterdeckungen am Ende des Gebührenbemessungszeitraumes basierend auf einer Nachkalkulation ermittelt und im folgenden Bemessungszeitraum ausgeglichen. In Abhängigkeit von den KAG der Bundesländer beträgt der Bemessungszeitraum zwischen 2 und 5 Jahren. Dabei wird in allen Bundesländern außer in Hessen die Kostenausgleichsvariante angewandt.

Bei der Ausgestaltung der Gebührensatzung können die ansatzfähigen Kosten in Form einer Mengen- (bzw. Verbrauchs-), Grund- als auch Mindestgebühr auf die Gebührenzahler übertragen werden. Im Gegensatz zu den anderen Gebühren fallen Mengengebühren erst bei Nutzung der Abwasseranlagen an. Mengengebühren beinhalten theoretisch ausschließlich variable Kosten. Real ist jedoch ein Fixkostenanteil enthalten. Wegen des unverhältnismäßig hohen Aufwandes bei der Gebührenerrechnung nach dem Wirklichkeitsmaßstab, bei welchem die dem System zugeführte exakte Abwassermenge maßgebend wäre, wird in der Praxis nach dem Wahrscheinlichkeitsmaßstab in Form des modifizierten Frischwassermaßstabes bemessen. Auch bei diesem Maßstab wird die Einhaltung des Verursacherprinzips gewährleistet. Der modifizierte Frischwassermaßstab berechnet sich aus den, in der Wasserversorgungsanlage und aus der Eigengewinnungsanlage entnommenen Wassermengen abzüglich der Wassermengen, welche nachweislich auf dem Grundstück verbraucht oder zurückgehalten wurden. Die Grundgebühr ist eine Benutzungsgebühr, welche für das Vorhalten der Einrichtungen erhoben wird. Demnach ist der Gebührenzahler verpflichtet, die Grundgebühr zu leisten, auch wenn dieser die Einrichtung nicht nutzt. Grundsätzlich dient die Grundgebühr zur Abdeckung der Fixkosten. Hinsichtlich des hohen Fixkostenanteils von ca. 80 % (DWA 2012b) wäre bei dieser Gebührengestaltung das umweltfördernde und ressourcensparende Bewusstsein (Verursacherprinzip) gefährdet. Deshalb sollte die Umlegung des Gesamtkostenanteils in der Grundgebühr 50 % nicht überschreiten (DWA 2012b). Als Bemessungsgrundlage für die Grundgebühr wird ein Wahrscheinlichkeitsmaßstab herangezogen. Am gebräuchlichsten ist die Verwendung der Wasserzählergröße als Bemessungsmaßstab, aber auch die Anzahl der Wohneinheiten, Anzahl der Bewohner oder die Hausanschlussgröße der Trinkwasserleitung findet Anwendung. Neben den bereits genannten Gebührenarten, findet die Integration der Mindestgebühr in den Gebührensatzungen eher seltener statt. Die Mindestgebühr ist eine pauschalisierte Verbrauchsgebühr, welche sich an der durchschnittlichen Mindestinanspruchnahme orientiert. Bei einer Unterschreitung dieses Betrages, wird der Gebührenzahler auf das Limit festgesetzt. Findet eine Überschreitung des Betrages statt, wird die Mindestgebühr außer Kraft gesetzt. Bei einer zu großen Abweichung zwischen Mindestabwassermenge und tatsächlicher Einleitungsmenge würde die Mindestgebühr gegen das Äquivalenzprinzip verstoßen, weshalb durch die sich verändernden Verbräuche die Gebühr in regelmäßigen Abständen anzupassen ist. Von einer parallelen Erhebung von Grundgebühr und Mindestgebühr rät DWA (2012b) aufgrund

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

der bereits angemessenen Beteiligung von Einleitern mit geringen Verbrauchsmengen durch die Grundgebühr ab. Gemäß den KAG von Bayern und Thüringen ist es den Kommunen untersagt, Mindestgebühren zu erheben.

Im Modell findet die Gebührenerhebung optional in Anlehnung an den betreffenden Aufgabenträger entweder ausschließlich durch eine Mengengebühr oder durch eine Kombination aus Grund- und Mengengebühr statt. Eine Berücksichtigung von Bemessungszeiträumen ist nicht gegeben. Ausgangswert für die Gebührenkalkulation sind die gebührenwirksamen Kosten, welche sich nach (98) aus den aufwandsfähigen Kosten abzüglich der kostenmindernden Erträge aus der Netzeinspeisung sowie den Auflösungen von Beiträgen und Investitionszuschüssen ergeben.

$$K_{G(t)} = K_{P(t)} + K_{M(t)} + K_{Z(t)} + K_{sAw(t)} + K_{A(t)} + K_{EKZ(t)} - Er_{NE(t)} - B_{A(t)} - Z_{A(t)} \quad (98)$$

$K_G$	Gebührenwirksame Kosten	(€)
$K_P$	Personalkosten	(€)
$K_M$	Materialkosten	(€)
$K_Z$	Zinskosten	(€)
$K_{sAw}$	Sonstige Aufwände	(€)
$K_A$	Abschreibungen	(€)
$K_{EKZ}$	Eigenkapitalzinsen	(€)
$Er_{NE}$	Erträge Netzeinspeisungen	(€)
$B_A$	Auflösung Beiträgen	(€)
$Z_A$	Auflösung Investitionszuschüsse	(€)

In Abhängigkeit von der Gebührengestaltung oder der modellseitigen Betrachtung berechnet sich nach (99) die jährliche Mengengebührenveränderung. Bei einer ausschließlichen Erhebung einer Mengengebühr oder bei einem über den Betrachtungszeitraum konstant bleibenden Grundgebührenertrag ergibt sich die Mengengebührenveränderung aus dem Quotienten der Differenz der gebührenwirksamen Kosten zwischen dem aktuellem und dem Vorjahr und der Jahresschmutzwassermenge. Findet im Betrachtungszeitraum eine Veränderung des Grundgebührenertrages statt, berechnet sich die jährliche Mengengebührenveränderung aus dem Quotienten der jährlichen Differenzen der gebührenwirksamen Kosten abzüglich des Grundgebührenertrages und der Jahresschmutzwassermenge.

$$\Delta G_{MG(t)} = \begin{cases} 0; \text{ wenn } t = 1 \\ \frac{K_{G(t)} - K_{G(t-1)}}{Q_{SW,EW,a(t)}}; \text{ wenn } t > 1 \wedge \neg G_{GG} \vee t > 1 \wedge \Delta Er_{GG} = 0 \\ \frac{K_{G(t)} - Er_{GG(t)} - K_{G(t-1)} - Er_{GG(t-1)}}{Q_{SW,EW,a(t)}}; \text{ wenn } t > 1 \wedge \exists! Er_{GG} \wedge \Delta Er_{GG} \neq 0 \end{cases} \quad (99)$$

$\Delta G_{MG}$	Mengengebührenveränderung	(€ m <sup>3</sup> )
$Er_{GG}$	Ertrag Grundgebühr	(€)

Der Grundgebührenertrag berechnet sich nach (100) aus dem Produkt aus dem Grundgebührensatz und der Anzahl der Hausanschlüsse sowie der Anschlüsse von Gewerbe und Industrie. Neuerschließungen im Betrachtungszeitraum führen, bei einem gleichbleibenden Grundgebührensatz, zur Erhöhung des



Grundgebührenertrages. Dies würde bei gleichbleibenden gebührenwirksamen Kosten und Schmutzwassermengen zu einer Minderung der Mengengebühren führen. Durch die steigende Zahl der Einwohner erhöht sich auch die Schmutzwassermenge, was eine weitere Senkung der Mengengebühr nach sich ziehen würde. Für die Gebührenberechnung besteht im Modell zusätzlich die Option zwischen einem fixen und variablen Fixkostenanteil zur Herleitung des Grundgebührensatzes. Durch einen variablen Fixkostenanteil findet eine permanente Anpassung des Grundgebührensatzes statt und somit auch eine Veränderung des Grundgebührenertrages.

$$Er_{GG(t)} = G_{GG(t)} \cdot N_{AS,Ges(t)} \quad (100)$$

$G_{GG}$	Grundgebühr	(€ BM <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )
$N_{AS,Ges}$	Anzahl Einleiter/ Anschlüsse	(-)

\*BM: Bemessungsgröße

#### 4.5 Implementierung und Applikation der Monte-Carlo-Simulationsmethodik

Mit Hilfe der MCS-Methodik nach Metropolis und Stanislaw (1949) wird es Simulationen von Modellsystemen ermöglicht, die Gesamtheit aller Konfigurationen (Konfigurationsraum), statt nur einen Bruchteil des Konfigurationsraumes, abzubilden. Die Methodik ist ein auf den Gesetzen der großen Zahlen basierendes stochastisches Verfahren zur numerischen Lösung von analytisch aufwendigen Problemen mittels der Wahrscheinlichkeitstheorie. Zur Generierung der Ergebnisse, welche sich im Konfigurationsraum ergeben, werden anhand eines Algorithmus Pseudo-Zufallszahlen erzeugt. Auf diese Weise kann die Reaktion eines Modells auf zufällig generierte Eingaben untersucht werden (Rubinstein und Kroese 2017, Robert und Casella 2010).

Die Gesetze der großen Zahlen bezeichnen bestimmte Grenzwerte der Stochastik und beschreiben, dass bei einer mehrfachen Wiederholung eines Zufallsexperimentes unter den gleichen Voraussetzungen eine Stabilisierung der relativen Häufigkeit nahe der theoretischen Wahrscheinlichkeit stattfindet. Dabei werden die Gesetze der großen Zahlen hinsichtlich der Konvergenz des arithmetischen Mittelwertes von Zufallsvariablen unterteilt in starke Gesetze mit einer nahezu sicheren Konvergenz und schwache mit einer stochastischen Konvergenz. Die zentralen Grenzwertsätze zählen zu den schwachen Gesetzen und beinhalten die Aussage, dass bei großer Anzahl von unabhängigen Zufallsvariablen deren Summe asymptotisch einer stabilen Verteilung folgt. Als Kernaussage im *Zentralen Grenzwertsatz* wird verstanden, dass die unendliche Summe von unabhängigen, identisch verteilten Zufallsvariablen mit endlicher Varianz und Erwartungswert gegen die Normalverteilung konvergiert (Nolan 2007).

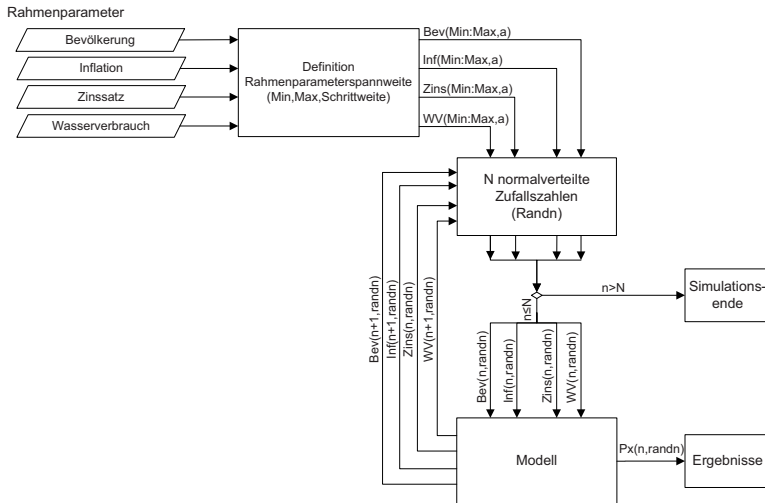
Der *Zentrale Grenzwertsatz* ist nach (101), für jedes reelle  $x$  wie folgt definiert.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{S_n - n_{zv} \cdot \mu}{\sigma \cdot \sqrt{n}}\right) = \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz = P(\xi \leq x), \xi \sim N(0,1) \quad (101)$$

$\xi$	Wahrscheinlichkeitsmaß	(-)
$S_n$	Teilsumme Zufallsvariablen	(-)
$n_{zv}$	Anzahl Zufallsvariablen	(-)
$\mu$	Erwartungswert	(-)
$\sigma$	Standardabweichung	(-)
$\Phi$	Verteilungsfunktion Standardnormalverteilung	(-)

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Die Integration der MC-Methode erfolgte durch eine Erweiterung des Modells. Hierfür wurden die Parametermatrizen der Ausgabeparameter angepasst, so dass die Konfigurationen und die aus diesen resultierenden Jahreswerten enthalten sind. Zudem wurde das Modell um einen Pseudo-Zufallszahlen-generator erweitert. Der Ablauf der MCS im Modell ist in Abbildung 4-24 schematisch dargestellt.



**Abbildung 4-24:** Schematische Abbildung der MCS-Rechenroutine und Integration ins Modell

Mittels der enthaltenen MATLAB®-Funktion *randn* werden - basierend auf der Range der Rahmenparameter und Rechenschrittweite - normalverteilte pseudounabhängige Pseudo-Zufallszahlen erzeugt, welche die statistischen Tests auf Zufälligkeit und Unabhängigkeit erfüllen. Daher können die erzeugten Zahlen als wahrhaft zufällig und unabhängig angenommen werden. Der Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass die Simulationen mit denselben Zahlen beliebig oft wiederholt werden können. Zur Generierung der normalverteilten Pseudo-Zufallszahlen wird für die *randn*-Funktion der Ziggurat-Algorithmus von Marsaglia und Tsang (2000, 1984) verwendet. Mittels des Algorithmus werden Werte aus einer monotonen abnehmenden Wahrscheinlichkeitsverteilung erzeugt, die bei symmetrischen unimodalen Verteilungen, wie z.B. bei der Normalverteilung angewendet werden können. Zwar ist dieser Algorithmus komplexer zu implementieren als die gängigen Methoden der Marsaglia-Polartechnik und die Box-Muller-Transformation, jedoch ist die Rechengeschwindigkeit höher. Der Ziggurat-Algorithmus ist ein Algorithmus zur Zurückweisung von Proben. Der Algorithmus generiert im ersten Schritt zufällig einen Punkt in einer Verteilung und prüft ob der erzeugte Punkt innerhalb der Normalverteilung liegt. Ist dies nicht der Fall, wird ein neuer Punkt erzeugt. Falls der Punkt unterhalb der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve liegt, ist die x-Koordinate des Punktes eine normalverteilte Zufallszahl (Moler 2004).

#### 4. Entwicklung und Aufbau eines prozessbasierten Modells

Für jede Konfiguration der Rahmenparameter nach (102), welche sich aus den generierten normalverteilten Pseudo-Zufallszahlen ergeben findet im Modell ein Simulationsdurchlauf über den Betrachtungszeitraum statt. Für die Ausgabe von Simulationsergebnissen können nur eindimensionale Parameter verwendet werden. Durch die Sicherung der Ergebnisse je Rahmenparameterkonfiguration entsteht eine zweidimensionale Matrix.

$$P_x(n, \text{randn}) = f(\text{RP}_{\text{Bev}(n, \text{randn})}, \text{RP}_{\text{Inf}(n, \text{randn})}, \text{RP}_{\text{Zins}(n, \text{randn})}, \text{RP}_{\text{WV}(n, \text{randn})}) \quad (102)$$

$P_x$	Ergebnisausgabe	(-)
$\text{RP}_{\text{Bev}}$	Rahmenparameter Bevölkerung	(-)
$\text{RP}_{\text{Inf}}$	Rahmenparameter Inflation	(-)
$\text{RP}_{\text{Zins}}$	Rahmenparameter Kreditzinssatz	(-)
$\text{RP}_{\text{WV}}$	Rahmenparameter häusl. Wasserverbrauch	(-)

Basierend auf den Rahmenparameterspannweiten und Rechenschrittweiten in Tabelle 4-12 ergeben sich bei Kombination aller möglicher Rahmenparameterwerte gemäß dem Permutationsgesetz 10.692 Kombinationen. Durch die Normalverteilung der Pseudo-Zufallszahlen entspricht die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Werte der Verteilungsfunktion. Dadurch ergeben sich Konfigurationen mit den Erwartungswerten häufiger (siehe Anhang 7), so dass nicht alle möglichen Konfigurationen, bei gleicher Anzahl von Simulationsdurchläufen, abgebildet werden. Bei der Pseudo-Zahlgenerierung unter Berücksichtigung der Normalverteilung ergaben sich insgesamt 1.369 Kombinationen. Der Vorteil dieser durch die Normalverteilung begründeten Beschränkung liegt darin, dass anhand der Simulationsergebnisse und einer gewählten Vertrauenswahrscheinlichkeit der Wahrscheinlichkeitsbereich ermittelt werden kann. Dieser Bereich wird auch als Konfidenzintervall oder Vertrauensbereich bezeichnet. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein simulierter Wert sich nicht im Konfidenzintervall befindet, wird als Irrtumswahrscheinlichkeit bezeichnet. Das Konfidenzintervall ergibt sich gemäß (103) aus dem MC-Schätzer, dem z-Wert, der Standardabweichung und der Anzahl der Stichproben. Der MC-Schätzer berechnet sich nach (104) und ergibt sich aus dem Mittelwert der Konfigurationen der MCS. Die Werte der z-Transformation werden benutzt, um die Wahrscheinlichkeit für die Normalverteilung zu ermitteln. Bei der Transformation wird eine standardnormalverteilte Zufallsvariable mit dem Erwartungswert Null und der Varianz Eins ausgegeben.

$$\text{KI}_{(i,t)} = \bar{X}_{m(1:N,t)} \mp z_{\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)} \cdot \frac{\sigma_{(1:N,t)}}{\sqrt{N}} \quad (103)$$

KI	Konfidenzintervall	(-)
$\bar{X}_m$	MC-Schätzer	(-)
z	Standardisierte Zufallsvariable (Konfidenzkoeffizient)	(-)
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit	(-)
N	Stichprobenumfang	(-)

$$\bar{X}_{m(1:N,t)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n \quad (104)$$

### 5. Entwicklung und Implementierung von Maßnahmenmodulen

#### 5.1 Auswahl von Anpassungsmaßnahmen zur Integration in das Modell

Hinsichtlich der Vielzahl an organisatorischen, infrastrukturellen und finanzwirtschaftlichen Anpassungen, wurden in Rücksprache mit dem für die Betrachtung ausgewählten Aufgabenträger drei Anpassungsmaßnahmen ausgewählt. Es wurden eine organisatorische und zwei infrastrukturelle Anpassungsmaßnahmen für die Modulkonzeption und Modellintegration festgelegt. Für die Auswahl war entscheidend, dass die Maßnahmen von der Modellstruktur abbildbar und nachhaltige Effekte und Einsparpotentiale zu erwarten sind.

Ein Optimierungsaspekt bei KA ist der Energieverbrauch, welcher einen Kostenanteil von 11 % (DWA 2014) von den Gesamtkosten ausmacht. Neben der Reduzierung des Energieverbrauchs durch die Optimierung von Anlagenkomponenten besteht eine weitere Option in der Senkung der Energiekosten pro Verbrauchseinheit. Durch die Eigenstromerzeugung und -verwertung aus der anaeroben Faulung gewonnenen Klärgases wird die externe Zufuhr bzw. der Einkauf an Energie (hier im Vordergrund elektrische Energie) reduziert. Die Wirtschaftlichkeitsgrenze der Faulungsanlagen hat sich in Bezug zur maßgebenden EW-Ausbaugröße in den vergangenen Jahren reduziert. Gegenwärtig ist die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage ab einer Ausbaugröße von 50.000 EW grundsätzlich gegeben. In Abhängigkeit von den Energiepreisen und der Einspeisevergütung gemäß der EEG- oder KWKG-Umlage wurde in Veröffentlichungen die Wirtschaftlichkeit auch bei einer Ausbaugröße von 20.000 EW nachgewiesen (TMLFUN 2012). Doch ist die Wirtschaftlichkeit bei Gesetzesnovellierungen hinsichtlich des Förderzuschlags zu prüfen. Neben der Senkung der Energiekosten hat die Klärschlammfaulung weitere positive Effekte, wie den Ausschluss weiterer Abbaureaktionen, die Reduzierung der Schlamm- bzw. Feststoffmenge, die Erhöhung der Entwässerbarkeit und die Verringerung von Krankheitserregern im Schlamm (DWA-M-368 2014). Bezogen auf die Verringerung der Feststoffmenge und die Verbesserung der Entwässerbarkeit reduzieren sich im Umkehrschluss auch die Entsorgungskosten. Ausweislich der vorliegenden Daten zu den Verfahrenstechniken der Standorte und des Modellaufbaus, in welchem die energetische Faulgasnutzung bereits betrachtet wird, ist die Integration einer solchen modularen Anpassungsmaßnahme ins Modell zur Betrachtung von möglichen Effekten und Einsparpotentialen gegeben. Im Hinblick auf die fragmentierten, weitläufigen Infrastrukturen der Aufgabenträger in M-V, findet in der Modulkonzeption die Betrachtung der Maßnahme auf das gesamte Entsorgungsgebiet statt. Sämtliche KA werden bei Eignung in das Konzept einbezogen und in Abhängigkeit von der Ausbaugröße und Lage werden Standorte für eine energetische Faulgasnutzung ermittelt. Die nicht ausgefallenen Schlämme der umliegenden Standorte sowie zusätzliche Co-Substrate werden zur Steigerung der Energiemengen-erzeugung den zentralen Faulgasanlagen zugeführt. In Anbetracht der Annahme und Verwertung der Schlämme anderer KA von zentralen Standorten wird in dieser Arbeit der Begriff Schlammverwertungszentrum (SVZ) verwendet.

Als zweite Anpassungsmaßnahme wurde im Kontext der in Fachkreisen kontrovers geführten Diskussionen über dezentrale, semi-zentrale oder zentrale Abwasserbeseitigungskonzepte eine

Überprüfung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit einer Strukturoptimierung im Zuge einer weitergehenden Zentralisierung als Modul konzipiert und in das Modell implementiert. Basierend auf den zur Verfügung stehenden Objektdaten, in welchen nur zentrale, kommunale KA enthalten sind, wird in dieser Arbeit unter weitergehender Zentralisierung die Stilllegung und damit zusammenhängende Überleitung einer zentralen kommunalen KA zu einer aufnehmenden zentralen kommunalen KA verstanden. Als wesentlicher Kostenpunkt sind die Herstellung und der Betrieb der Kanalleitung für die Überleitung zu benennen, diese stehen in Konkurrenz zu den gegenwärtigen Betriebskosten der stillzulegenden KA. Diese Maßnahmenbetrachtung kann auch als Ausschlussverfahren betrachtet werden, in dem für Standorte eine weitergehende Zentralisierung aus ökonomischen Gründen auszuschließen ist. In einer separaten unabhängigen Untersuchung kann dann geprüft werden, ob für diese Standorte andere Konzepte zu weiteren Einsparpotentialen führen.

Aufgrund möglicher großer Einsparpotentiale wurden als organisatorische Anpassungsmaßnahme die Zusammenschlussformen Kooperation und Fusionierung zwischen Aufgabenträgern für eine Betrachtung konzipiert und ins Modell implementiert. Im Sinne der Kooperation als kollektive Handlungsstrategie findet in dieser Arbeit die Betrachtung des Effektes einer Zusammenlegung der Verwaltung zwischen zwei Aufgabenträgern statt. Die rechtliche Selbstständigkeit der beteiligten Aufgabenträger bleibt dabei erhalten. Durch die Zusammenlegung von Organisationseinheiten in der Verwaltung von kaufmännischen Services (Finanzen, Einkauf, Controlling, Kundenservice), technischen Services (IT, Planung und Bau, Anlagen-, Netz und ggf. Flussgebietsmanagement) und personellen Services (Personalwirtschaft, -gewinnung und -organisation, Gesundheits- und Arbeitsschutz) als auch bei der technischen und Unternehmensleitung ergeben sich Synergien und Einsparpotentiale bei der Beschaffung, in der Personalauslastung, Qualitäts-, Qualifikations-, Kompetenz- und Effizienzsteigerungen (Graetz 2008). Langfristig kann durch diese Synergien Personal eingespart werden. Dies betrifft vor allem die Führungsebene bei Zusammenlegungen von Organisationseinheiten, aber auch die Stellen von Sachbearbeitern, wenn durch bessere IT-, EDV- und Softwarelösungen mehr Kapazität geschaffen wird. Personaleinsparungen im öffentlichen Sektor erfolgen grundsätzlich über einen altersbedingten Stellenabbau. Bei der Fusion wird von einem Zusammenschluss der beteiligten Aufgabenträger zu einem neuen Aufgabenträger ausgegangen. Dadurch wird die rechtliche Selbstständigkeit der Beteiligten aufgegeben. Für die modellseitige Betrachtung wird bei der Fusionierung in Analogie zur Kooperation ausschließlich von Personalkosteneinsparungen in der Verwaltung ausgegangen sowie das zusätzliche Einsparpotential durch Synergieeffekte in der Beschaffung und bei den Leistungsverträgen berücksichtigt. Für den neuen Aufgabenträger wird basierend auf den Gesamtkosten und Einsparungen eine neue vereinheitlichte Gebühr für das gesamte neuentstandene Entsorgungsgebiet berechnet. Eine Fusionierung zwischen zwei Aufgabenträgern ist unter realen Umständen komplexer, denn hierbei sind im Sinne des Gleichbehandlungs- und Äquivalenzprinzips die zum Teil differenzierten Gebühren der Städte und Kommunen sowie die eingezahlten Beiträge zu beachten. Durch die zusätzliche Abfrage von Informationen bezüglich der Personalstruktur sowie den anfallenden Personalkosten in den Kostenstellen des zu betrachtenden Aufgabenträgers lässt sich eine vereinfachte Betrachtung von möglichen Effekten eines Zusammenschlusses durchführen. Zur Ermittlung dieser Einsparpotentiale

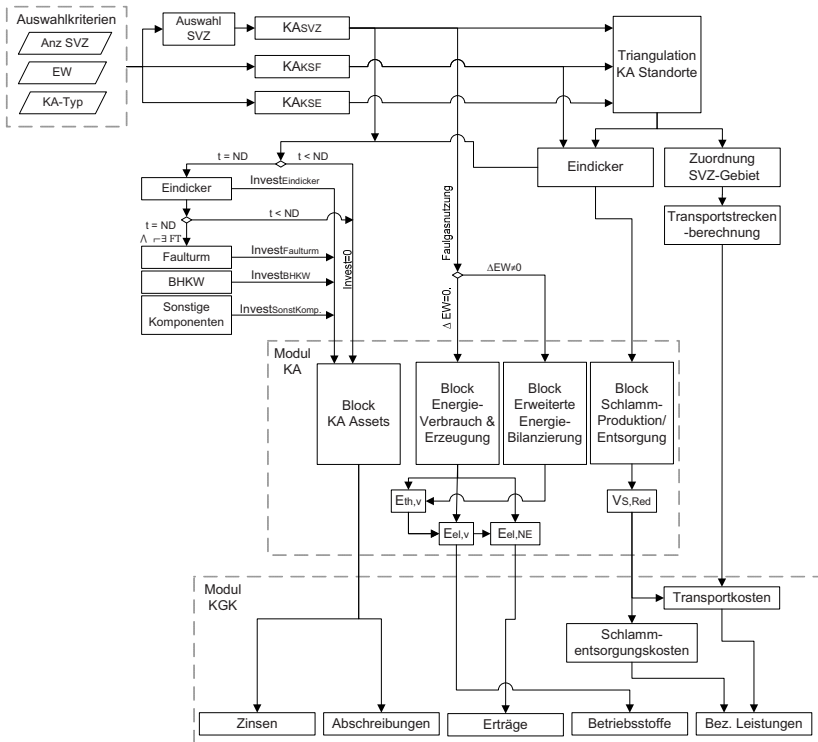
und zur Hebung des Einsparpotentials durch die Verknüpfung dieser Anpassungsmaßnahme mit den beiden anderen wurde das Modul Zusammenschluss konzipiert.

### 5.2 Schlammverwertungszentrum

Im konzipierten Anpassungsmaßnahmenmodul *SVZ* findet anhand von Kriterien die Auswahl von einem oder mehreren Schlammverwertungszentren (*SVZ*) statt. Dabei erfolgt die Selektion über die Verfahrenstechnik und GK bzw. EW. Bei mehreren in Frage kommenden größeren KA im Bewirtschaftungsgebiet kann die Anzahl der Zentren begrenzt werden. Für die ausgewählten *SVZ* ohne vorhandene Faulgasnutzung, wird die Bestandsanlage um die entsprechenden Verfahrenskomponenten, wie Faulbehälter, Rohschlammspeicher, maschineller Voreindicker, Gasspeicher, Gasfackel und BHKW erweitert. Bei der Umstellung von aerober zu anaerober Stabilisierung bedarf es zusätzlich einer VK. Nach erfolgter Festlegung der *SVZ*-Standorte werden die übrigen KA mit geeigneter Verfahrensstufe mittels Triangulation anhand der Distanz dem nächstgelegenen *SVZ* zugeordnet. Für diese KA findet zusätzlich eine Überprüfung statt, ob hinsichtlich der Schlamm-mengen eine dezentrale Eindickung ökonomisch von Vorteil wäre. Durch die Eindickung reduzieren sich die Masse und das Volumen des Schlammes, dadurch werden Transportkosten eingespart. Ist in Abhängigkeit von der Schlammmenge und der Transportstrecke die Einsparung größer als die Kapitalkosten für den Eindicker, wird die Installation des Eindickers umgesetzt. Existiert bereits eine Faulgasnutzung am Standort, werden die Einbringung von geeigneten Schlämmen der anderen KA sowie eine optimierte Entwässerung der Schlämme angenommen. Bei Erweiterung des Entsorgungsgebietes um weitere Standorte (z.B. bei einem Zusammenschluss von Aufgabenträgern) wird über die Kapazitätsbetrachtung der Faulbehältervolumina für den jeweiligen Standort ermittelt, ob ein zusätzlicher Ausbau hinsichtlich des Volumens notwendig wäre. Sämtliche verfahrenstechnische Informationen und Parameter des entwickelten *SVZ*-Gesamtkonzeptes werden an das Modul *KA* übergeben. Erfolgt ein Neu- oder Ausbau, werden Informationen und verfahrenstechnische Parameter den Blöcken *KA-Assets*, *Energieverbrauch & -erzeugung* sowie *Schlammproduktion/ Entsorgung* übergeben. Innerhalb der Anpassungsmaßnahmenbetrachtung findet eine erweiterte detailliertere Energiebilanzierung statt, bei welcher die erzeugte thermische Energie zur Wärmeregulation des Faulbehälters genutzt wird.

Mit der Übergabe der prozessbasierten Parameter zum Modul *KGK* findet im Anschluss die Herleitung der Kosten und Gebührenberechnung statt. Die Rechenabläufe des Moduls *SVZ* sind in Abbildung 5-1 generalisiert und vereinfacht dargestellt.

## 5. Entwicklung und Implementierung von Maßnahmen



**Abbildung 5-1:** Schematische vereinfachte Abbildung der Rechenabläufe des Moduls SVZ

Folgend werden die Berechnungen bezüglich der Energiebilanz, Kostenermittlung und Transportkostenermittlung des Moduls *SVZ* näher erläutert.

Bei der Energiebilanzierung des *SVZ* werden bei einer neu zu errichtenden Faulgasnutzungsanlage für die Ermittlung des Energieverbrauchs neben dem elektrischen Energieverbrauch der Anlage für Rührer und zusätzliche Pumpen auch die benötigte thermische Energie für den anaeroben Faulungsprozess im Behälter berücksichtigt. Findet keine ausreichende Wärmeenergieerzeugung aus den produzierten Faulgasmenen statt, wird die fehlende Wärmeenergiemenge durch Heizplatten erzeugt, dies führt zu einem zusätzlichen elektrischen Energieverbrauch, welcher ggf. aufgeschlagen wird. Bei KA mit einer bereits bestehenden Faulgasnutzungsanlage, findet diese detailliertere Betrachtung nicht statt, da angenommen wird, dass diese zusätzlichen Energieverbräuche in der Gesamtenergiebilanz der KA bereits enthalten sind.

Der restliche elektrische Energiebedarf nach Abzug der erzeugten elektrischen Energie aus dem Klärgas wird nach (105) ermittelt. Es findet hinsichtlich der Energiebilanzierung eine Unterscheidung statt, ob bereits eine Faulgasnutzung vorhanden ist oder erst im Zuge des SVZ-Konzeptes errichtet wird. Für bereits bestehende Anlagen erhöht sich der Energieverbrauch ausschließlich bei Erhöhung der Schlammengen oder bei einer Erweiterung der Anlage. Ausschlaggebend sind dabei die zusätzlichen EW-Zahlen. Im Zuge der erweiterten Energiebilanzierung wird die thermische Energiedifferenz aus der erzeugten thermischen Energie der Faulgasnutzung und der für den Prozess aufzuwendenden thermischen Energie nach (106) berechnet. Daraus resultiert ggf. der eventuelle zusätzliche Bedarf an elektrischer Energie für die Wärmeregulierung der Faulbehälter. Nach (107) wird die Differenz zwischen der aus Faulgas erzeugten und der für den Prozess benötigten elektrischen Energie ermittelt.

$$E_{el,K\bar{A},Verbr(n,t)} = \begin{cases} E_{el,K\bar{A},Verbr(n,t)} & \text{wenn } \exists(SVZ) \wedge EW = \text{const.} \vee \exists(SVZ) < 0 \wedge \Delta E_{th,SVZ(n,t)} > 0 \wedge \Delta E_{el,SVZ(n,t)} \\ E_{el,K\bar{A},Verbr(n,t)} + \Delta E_{th,SVZ(n,t)} & \text{wenn } \exists(SVZ) \wedge \Delta E_{th,SVZ(n,t)} > 0 \wedge \Delta E_{el,SVZ(n,t)} < 0 \\ E_{el,K\bar{A},Verbr(n,t)} + \Delta E_{el,SVZ(n,t)} ; & \\ \text{wenn } \exists(SVZ) \wedge \Delta E_{th,SVZ(n,t)} < 0 \wedge \Delta E_{el,SVZ(n,t)} & \\ E_{el,K\bar{A},Verbr(n,t)} + \Delta E_{th,SVZ(n,t)} + \Delta E_{el,SVZ(n,t)} & \\ \text{wenn } \exists(SVZ) \wedge \Delta E_{th,SVZ(n,t)} < 0 \wedge \Delta E_{el,SVZ(n,t)} > 0 & \end{cases} \quad (105)$$

$E_{el,K\bar{A},Verbr}$	Elektrischer Energieverbrauch KA	(kWh)
$\Delta E_{th,SVZ}$	Differenz thermische Energiemenge	(kWh)
$\Delta E_{el,SVZ}$	Differenz elektrische Energiemenge	(kWh)

$$\Delta E_{th,SVZ} = E_{th,E,SVZ} - E_{th,SVZ,Verbr} \quad (106) \quad \Delta E_{el,SVZ} = E_{el,E,SVZ} - E_{el,SVZ,Verbr} \quad (107)$$

$E_{th,E,SVZ}$	Erzeugung thermische Energie SVZ	(kWh)
$E_{el,E,SVZ}$	Erzeugung elektrische Energie SVZ	(kWh)
$E_{th,SVZ,Verbr}$	Verbrauch thermische Energie SVZ	(kWh)
$E_{el,SVZ,Verbr}$	Verbrauch elektrische Energie SVZ	(kWh)

Der thermische Energieverbrauch der Faulung berechnet sich nach (108) aus den auf den Schlamm bezogenen Einwohnerwerten des SVZ und dem einwohnerspezifischen Verbrauchswert, der für die Wärmezufuhr des Faulbehälters als Standardwert gemäß Lindtner (2008) mit 10 kWh EW<sup>-1</sup> im Modell definiert wurde. In Analogie zur thermischen findet auch die elektrische Energieverbrauchsermittlung nach (109) statt. Für den einwohnerspezifischen elektrischen Verbrauchswert für die gesamte Faulung wurden für die Modulkonzeption die minimalen Verbrauchswerte nach Lindtner (2008) angesetzt. Aus dem einwohnerspezifischen Verbrauchswert für die maschinelle Schlammmeindickung und des statischen Eindickers von 0,5 kWh EW<sup>-1</sup> bis 1 kWh EW<sup>-1</sup> sowie für den des Rührwerks vom Faulbehälter mit 1 kWh EW<sup>-1</sup> bis 2,5 kWh EW<sup>-1</sup> wurde für die gesamte Faulung ein Verbrauchswert von 1,5 kWh EW<sup>-1</sup> als Standardwert definiert.



## 5. Entwicklung und Implementierung von Maßnahmen

$$E_{th,SVZ,Verbr(n,t)} = E_{th,EW,ZA} \cdot \left( N_{EW,SVZ(t)} + \sum_1^n N_{EW,zugKA(n,t)} \right) \quad (108)$$

$E_{th,EW,ZA}$	EW-spezif. thermischer Energieverbrauch Faulgasnutzungsanlage	(kWh EW <sup>-1</sup> )
$N_{EW,SVZ}$	Einwohnerwerte SVZ	(EW)
$N_{zugKA}$	Einwohnerwerte SVZ zugehörige KA	(EW)

$$E_{el,SVZ,Verbr} = E_{el,EW,ZA} \cdot \left( N_{EW,SVZ(t)} + \sum_1^n N_{EW,zugKA(n,t)} \right) \quad (109)$$

$E_{el,EW,ZA}$	EW-spezif. elektrischer Energieverbrauch Faulung	(kWh)
----------------	--	-------

Die erzeugte elektrische Energie wird im Modell nach (110) über die Berechnung der Faulgasmengen ermittelt (siehe Kap. 4.4.2). Existiert bereits eine Faulung und bleibt die Schlammmenge unverändert, bleibt auch die erzeugte elektrische Energiemenge gleich. Erfolgt eine Zugabe zusätzlicher Schlammengen, findet eine Überprüfung der freien Faulbehälterkapazitäten statt. Enthalten die Faulbehälter Co-Substratmengen, werden hinsichtlich der besseren Gasausbeute die Co-Substrate zu Gunsten der Behandlungsschlämme nach (111) substituiert. Die Energiemengen aus den zusätzlichen Schlammengen der anderen KA nach (112) werden der Energiebilanz hinzugefügt. Bei einem Anlagenneubau wird die Energiemenge ermittelt. Die Auslegung der Faulgasanlage erfolgt unter Annahme, dass keine Co-Substrate enthalten sind. Ab dem Folgejahr der Maßnahmenumsetzung werden ausschließlich die Differenzen der Energiemengen betrachtet, welche sich in Form der Schlammproduktion durch die Bevölkerungs-, Gewerbe- und Industrieentwicklung als auch der Veränderung des häuslichen Wasserverbrauchs ergeben. In gleicher Form wie (110) erfolgt die Berechnung der thermischen Energieerzeugung. Aufgrund der Analogie wird auf deren Darstellung verzichtet.

$$E_{el,E(n,t)} = \begin{cases} E_{el,E(n,t)} ; \text{wenn } \exists(SVZ) \wedge M_{S,SVZ,d} = \text{const.} \\ E_{el,E(n,t)} + \Delta E_{el,E,CS(n,t)} + E_{el,E,zusKA(n,t)} ; \text{wenn } \exists(SVZ) \wedge \Delta E_{el,E,CS(n,t)} \neq 0 \\ \quad \wedge E_{el,E,zusKA(n,t)} \neq 0 \\ E_{el,E(n,t)} + E_{el,E,zusKA(n,t)} \\ E_{el,E(n,t)} + \Delta E_{el,SVZ(n,t)} \end{cases} \quad (110)$$

$E_{el,E}$	Erzeugte elektrische Energie	(kWh)
$\Delta E_{el,E,CS}$	Differenz erzeugte elektrische Energie Co-Substrat	(kWh)
$E_{el,E,zusKA}$	Erzeugte elektrische Energie Schlämme zusätzlicher KA	(kWh)

$$\Delta E_{el,E,CS(n,t)} = \begin{cases} 0 \\ \eta_{BHKW,el} \cdot (V_{Gas,zusKA(n,t)} - V_{Gas,CS(n,t)}) \end{cases} \quad (111)$$

$V_{Gas,CS}$	Gasertrag Co-Substrat	(N m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )
$V_{Gas,zusKA}$	Gasertrag Schlämme zusätzlicher KA	(N m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )
$\eta_{BHKW,el}$	Elektrischer Gesamtwirkungsgrad BHKW	(-)

$$E_{el,E,zusKA(n,t)} = \eta_{BHKW,el} \cdot V_{Gas,zusKA(n,t)} \quad (112)$$

Ein wesentlicher Bestandteil des *SVZ*-Maßnahmenkonzeptes ist der Transport von Schlammern geeigneter, im EZG des *SVZ* anliegender KA für die Faulgas erzeugung. Die Transportkosten sind unter diesem Aspekt eher zweitrangig. Dennoch soll die Herangehensweise zur Berechnung der Transportkosten erwähnt und die dafür benötigte Transportwegberechnung und die Ermittlung der Schlamm-mengen erläutert sein.

Die Transportkosten berechnen sich aus dem Produkt der zu transportierenden Schlamm-mengen, den Transportwegen und dem Tonnenkilometerpreis. Bei mehreren *SVZ* im Maßnahmenkonzept werden dem jeweiligen *SVZ* die zugehörigen Schlamm-mengen der anderen geeigneten KA in deren Entsorgungsgebiet zugewiesen. Die Transportwegberechnung basiert auf der Triangulation für die Ermittlung der *SVZ*-Standorte und deren zugehörige KA. Hierfür werden je *SVZ* die zugehörigen KA der Entfernung nach absteigend sortiert. Ausgehend von der Sortierung der KA wird unter Berücksichtigung der Lage nach (113) der kürzeste Transportweg zwischen dem *SVZ* und den anderen KA ermittelt.

$$s_{opti(n)} = \begin{cases} \sqrt{s_{HW(1,n)}^2 + s_{RW(1,n)}^2} ; \text{wenn } s_{(n,n-1)} > s_{(1,1)} \\ \sqrt{s_{HW(n,n-1)}^2 + s_{RW(n,n-1)}^2} ; \text{wenn } s_{(n,n)} < s_{(1,n)} \wedge s_{(1,1)} \wedge n > 1 \end{cases} \quad (113)$$

$s_{HW}$	Strecke zwischen Hochwerten	(km)
$s_{RW}$	Strecke zwischen Rechtswerten	(km)

Zur Herleitung der Investitionskosten für die zusätzlichen Anlagenkomponenten der Faulung werden die in Tabelle 5-1 enthaltenen vom MULEWF (2014) veröffentlichten Kostenfunktionen verwendet. Die Funktionen leiten einwohnerspezifische Kosten, wie z.B. für Bau und Ausrüstung her und basieren auf Erfahrungswerten, spezifischen Raumpreisen und aktuellen Ausschreibungsergebnissen. In Abhängigkeit von den vorhandenen Anlagenkomponenten des Standortes wird auf die jeweilige Kostenfunktion zurückgegriffen. In der Kostenfunktion  $k_{SVZ,KF}$  sind die Gesamtkosten einer Verfahrensumstellung von einer aeroben zu einer anaeroben Schlammstabilisierung mit nachgeschalteter Faulung enthalten. Dementsprechend sind in dieser Funktion Kosten für eine VK inkludiert. Neben den Kosten für die VK sind in den Gesamtinvestitionskosten solche für Faulturm, Zwischen-PWK, Maschinelle Voreindickung, Schlammvorlagebehälter, Technikgebäude, Gasspeicher, Gasfackel und BHKW enthalten. Des Weiteren sind die einwohnerspezifischen Kostenfunktionen für die VK ( $k_{VK,KF}$ ), Eindicker ( $k_{ED,KF}$ ) und Faulturm ( $k_{FT,KF}$ ) angegeben.

**Tabelle 5-1:** Kostenfunktionen für den Neu- und Ausbau des SVZ nach MULEWF (2014)

Komponente	Symbol	Kostenfunktion	Bezug	Einheit
Gesamtkosten	$k_{SVZ,KF}$	$7.7647 \cdot EW_x^{-0,6747}$		
VK	$k_{VK,KF}$	$2.863,60 \cdot EW_x^{-0,551}$	2013	€ $EW^{-1}$
Eindicker	$k_{ED,KF}$	$6.963,90 \cdot EW_x^{-0,732}$		
Faulturm	$k_{FT,KF}$	$26.402 \cdot EW_x^{-0,6648}$		

Zur Herleitung der aktuellen Bruttokosten zum Investitionszeitpunkt wird nach (114) unter Berücksichtigung inflationärer Kostensteigerungen, die MwSt einbezogen. In Abhängigkeit vom Investitionszeitpunkt und dem Bezugsjahr der Kostenfunktion findet entweder eine Kontierung oder Diskontierung zur Berücksichtigung der Inflation statt. Die Anlagenkomponenten des *SVZ*-Konzepts werden den Zusatzanlagen zugeordnet.

$$K_{ZusA(n,t)} = \begin{cases} K_{ZA(n,t)} + \frac{MwSt(t) \cdot (K_{ZusA,SVZ(n,t)} + K_{ZusA,zusKA(n,t)})}{(1 + r_{Inf})^{(BJ_{KF} - BJ_{Prog} + t)}}; & \text{wenn } BJ_{Prog} + t < BJ_{KF} \\ K_{ZA(n,t)} + MwSt(t) \cdot (K_{ZusA,SVZ(n,t)} + K_{ZusA,zusKA(n,t)}) \cdot (1 + r_{Inf})^{(BJ_{Prog} + t - BJ_{KF})}; & \text{wenn } BJ_{Prog} + t \geq BJ_{KF} \end{cases} \quad (114)$$

$K_{ZusA}$	Investitionskosten Zusatzanlagen (gesamt)	(€)
$K_{ZusA,SVZ}$	Investitionskosten Zusatzanlagen SVZ-Standort	(€)
$K_{ZusA,zusKA}$	Investitionskosten Zusatzanlagen integrierter KA	(€)
MwSt	Mehrwertsteuer	(-)
$r_{Inf}$	Inflationsrate	(-)
$BJ_{KF}$	Bezugsjahr Kostenfunktion	(-)
$BJ_{Prog}$	Bezugsjahr Prognose	(-)

Für die Herleitung der Kosten wird gemäß (115) zwischen Neu- und Ausbau der Faulung unterschieden. Bei einem Neubau an einem Standort erfolgt die Berechnung der Investitionskosten nach (116) in Abhängigkeit der vorhandenen Art der Schlammstabilisierung. Liegt eine aerobe Schlammstabilisierung vor, bedarf es des zusätzlichen Baus einer VK für die anaerobe Stabilisierung. Zur Ermittlung der Investitionskosten wird die Kostenfunktion  $k_{SVZ,KF}$  herangezogen, in welcher die Kosten der VK bereits enthalten sind. Basierend auf der EW-Zahl des *SVZ*, bestehend aus den EW des Standortes selbst sowie den EW der KA, deren Schlämme mit angenommen werden, würden bezüglich der VK zu hohe Investitionskosten resultieren, da die VK sich nur auf das Abwasser des Standortes bezieht. Deshalb erfolgt eine Bereinigung der Kosten über die Kostenfunktion  $k_{VK,KF}$  und die EW-Zahlen der zusätzlichen KA. Bei einer KA mit anaerober Schlammstabilisierung werden die resultierenden Investitionskosten aus der Kostenfunktion  $k_{SVZ,KF}$  um den Kostenanteil der VK bereinigt. Ergibt die Kapazitätsbetrachtung von bereits vorhandenen Faultürmen, dass die Kapazität nicht ausreicht, um die zusätzlichen Schlammengen von dem *SVZ*-Standort zugehörigen KA aufzunehmen, wird modellseitig angenommen, dass zum Zeitpunkt der Maßnahmenumsetzung als Provisorium bis zur nächsten Reinvestition der Anlage zusätzliches Faulraumvolumen durch einen Bedarfsfaulbehälter geschaffen wird. Die Investitionskostenermittlung für den Ausbau erfolgt nach (117) auf Basis der Kostenfunktion für den Faulturm ( $k_{FT,KF}$ ) sowie den Einwohnerwerten des Standortes und den damit im Verhältnis stehenden überschüssigen Trockensubstanzmengen der

Schlämme als benötigte zusätzliche Kapazität. Dabei ergibt sich die benötigte zusätzliche Kapazität aus der Gesamtschlammmenge abzüglich der restlichen freien Kapazität des Faulbehälters in Bezug zu den Trockensubstanzmengen und der Trockensubstanzmenge an Co-Substraten. Im Zuge der Reinvestition werden alle Komponenten der Faulgasnutzungsanlage erneuert und nach der neuen EW-Zahl des SVZ dimensioniert. Die Kostenherleitung erfolgt dann gemäß (116).

Alle nach der Anpassungsmaßnahme SVZ zu errichtenden Anlagenkomponenten werden den Zusatzanlagen der jeweiligen KA im Modul KA zugewiesen. Modellseitig werden die einzelnen Anlagenkomponenten der Faulgasnutzungsanlage hinsichtlich der Investitionen- und Reinvestitionen als eine Komponente bzw. Einheit betrachtet. Die Herleitung der Investitionskosten erfolgt - wie in Kap. 4.4.2 für den Block *Asset-Assessment* beschrieben - unterteilt in die Baukomponenten BT, MT und ESMR. Beim Bau und der Herstellung der Anlagenkomponenten werden alle Baukomponenten gleichzeitig errichtet, deshalb wird zur Ermittlung der Investitionskosten zum Zeitpunkt der Maßnahmenumsetzung die Summe über die drei Baukomponentenarten gebildet. Anschließend kann, durch die Betrachtung der Anlagenkomponenten als eine Einheit, der Erneuerungszeitpunkt der Baukomponenten für Zusatzanlagen nach Tabelle 4-23 ermittelt werden.

Bei der Darstellung der Formeln (115) bis (118) sind die einwohnerspezifischen Kosten enthalten, welche mittels EW-Zahlen berechnet werden. Zur weiteren Ermittlung der Investitionskosten wird, wie in den Formeln abgebildet, das Produkt aus den einwohnerspezifischen Kosten und der EW-Zahl gebildet.

$$K_{\text{ZusA,SVZ}(n,t)} = \begin{cases} K_{\text{SVZ,Neu}(n,t)} ; & \text{wenn } \neg \exists(SF) \\ K_{\text{SVZ,Aus}(n,t)} ; & \text{wenn } \exists(SF) \end{cases} \quad (115)$$

$K_{\text{SVZ,Neu}}$	Investitionskosten Neubau Faulgasnutzungsanlage	(€)
$K_{\text{SVZ,Aus}}$	Investitionskosten Ausbau vorhandener Faulgasnutzungsanlage	(€)

$$K_{\text{SVZ,Neu}(n,t)} = \begin{cases} \sum_{x=1}^3 (p_{KA,x} \cdot k_{\text{SVZ,KF}} \cdot N_{\text{EW,SVZ}(n,t)} - k_{VK,KF} \cdot N_{\text{EW,zugKA}(n,t)}) ; & \text{wenn SS = aerob} \\ \sum_{x=1}^3 (p_{KA,x} \cdot (k_{\text{SVZ,KF}} - k_{VK,KF}) \cdot (N_{\text{EW,SVZ}(n,t)} + N_{\text{EW,zugKA}(n,t)})) ; & \text{wenn SS = anaerob} \end{cases} \quad (116)$$

$p_{KA,x}$	Baukomponentenanteil (BT, MT, ESMR)	(-)
$k_{\text{SVZ,KF}}$	EW-spezif. Gesamtinvestitionskosten SVZ	(€ EW <sup>-1</sup> )
$k_{VK,KF}$	EW-spezif. Investitionskosten einer Faulung	(€ EW <sup>-1</sup> )

$$K_{\text{SVZ,Aus}(n,t)} = \begin{cases} 0 & \text{wenn } (1 - f_{\text{FT}}) \cdot (M_{\text{S,Ges}(n,t)} + M_{\text{CS}}) - M_{\text{CS}} \geq M_{\text{S,zus}} \\ \sum_{x=1}^3 p_{KA,x} \cdot \frac{M_{\text{S,zus}(n,t)} - (1 - f_{\text{FT}}) \cdot (M_{\text{S,Ges}(n,t)} + M_{\text{CS}}) - M_{\text{CS}}}{M_{\text{S,Ges}(n,t)} + M_{\text{CS}} + M_{\text{S,zus}(n,t)}} \cdot N_{\text{EW,SVZ}(n,t)} \cdot k_{\text{FT,KF}} & \text{wenn } (1 - f_{\text{FT}}) \cdot (M_{\text{S,Ges}(n,t)} + M_{\text{CS}}) - M_{\text{CS}} < M_{\text{S,zus}} \end{cases} \quad (117)$$

## 5. Entwicklung und Implementierung von Maßnahmen

---

$M_{S,zus}$	Trockensubstanzmenge anderer KA	(kg TS d <sup>-1</sup> )
$M_{S,Ges}$	Trockensubstanzmenge SVZ	(kg TS d <sup>-1</sup> )
$M_{CS}$	Trockensubstanzmenge Co-Substrate	(kg TS d <sup>-1</sup> )
$f_{FT}$	Kapazitäts- / Auslastungsfaktor Faulung	(-)

Ergibt sich ein ökonomischer Nutzen aus der Schlammvolumenreduktion durch einen Eindicker bei KA, welche ihren Schlamm zum SVZ transportieren, werden die Investitionskosten für den Eindicker mittels der einwohnerspezifischen Kostenfunktion  $k_{ED,KF}$  ermittelt. Aus dem Produkt der einwohnerspezifischen Kosten und der EW-Zahl resultieren die Investitionskosten für die Eindicker. Die Summe aller Investitionskosten für die Eindicker an den KA, welche den jeweiligen SVZ angehören, ergibt in Abhängigkeit von den Baukomponenten deren gebündelte Investitionskosten.

$$K_{ZusA,zusKA(n,t)} = \sum_{x=1}^3 p_{KA,x} \cdot \sum_{n=1}^N K_{ED,Neu(n,t)} \quad (118)$$

$K_{ED,Neu}$  Investitionskosten Klärschlamm-eindicker (€)

Aus den ermittelten Investitionskosten werden die Kapitalkosten des Maßnahmenkonzeptes im Modul *KGK* ermittelt. Die neuen Sachanlagenwerte werden eingetragen und fortlaufend in den Modulen als auch bei den Aktiva und Passiva mitbetrachtet. Des Weiteren werden die prozessbasierten Parameter bezüglich der Schlamm-mengen, Schlammtransportwege, Energieverbräuche und Energiegewinnung dem Modul *KGK* übergeben, in welchem die Herleitung der Kosten und der resultierenden Gebühren stattfinden.

### 5.3 Zentralisierung der Abwasserbehandlung

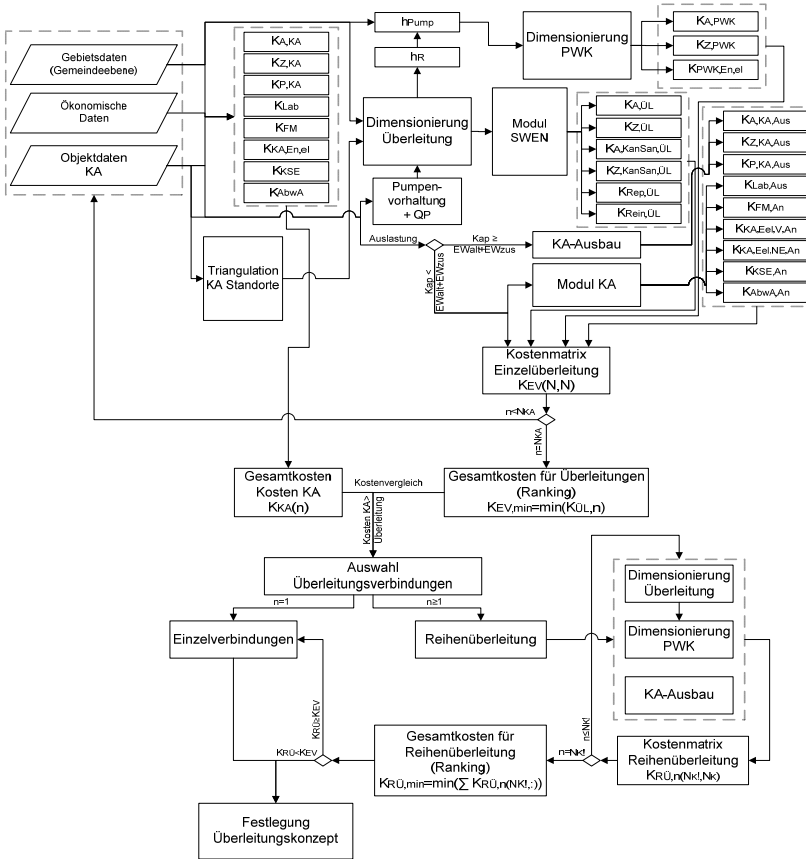
Bei der Anpassungsmaßnahme *Zentralisierung* wird jeder Standort im Entsorgungsgebiet geprüft, ob eine Überleitung zu einem anderen Standort ökonomischer ist, als ein Erhalt des Standortes und des gegenwärtigen Abwasserbeseitigungskonzeptes mit den damit verbundenen Reinvestitionen und Kosten. Für die Überleitung von einem zu einem anderen Standort wird die betreffende KA stillgelegt und stattdessen für die Förderung des Abwassers zu anderen KA ein PWK samt Leitung zur Überleitung errichtet. Am Kanalnetz des Standortes der stillgelegten KA finden keine Veränderungen statt. Durch die zusätzlichen Abwassermengen für die aufnehmende KA findet für diesen Standort eine Prüfung statt, ob die Kapazität ausreicht oder ein Ausbau erforderlich ist. Führt der Ausbau zu einer Veränderung der GK erhöhen sich im Umkehrschluss auch die Kosten für die Wartungsarbeiten und Laboranalysen. Des Weiteren führt eine GK-bedingte Veränderung der Überwachungswerte zu einer Abweichung bei den Schadeinheiten und somit bei der Abwasserabgabe. In Abhängigkeit von der vorhandenen Technik an diesem Standort kann dies zu einer Verringerung der Schlamm-entsorgungskosten oder zu einer Erhöhung der Energiemenge führen und somit zu einer Senkung der Stromkosten. Für den Fall, dass kein Eigenbedarf an elektrischer Energie mehr benötigt wird, führt dies zu einer Erhöhung des Ertrags aus Netzeinspeisung. Sämtliche kostenverändernden Aspekte beider Konzepte werden zusammengetragen und die Summen einander gegenübergestellt. Nur bei einem resultierenden Einsparpotential wird modellseitig das Überleitungskonzept favorisiert. Neben der ökonomischen Prüfung von einzelnen Überleitungskonzepten findet im Modul für den Fall, dass

mehrere stillzulegende KA zur selben aufnehmenden KA überleiten, eine Überprüfung von Reihenüberleitungskonzepten statt. In Abhängigkeit von der zu überwindenden Distanz, der Abwassermenge und der damit verbundenen Auslegung der PWK und Leitungen sind weitere Einsparpotentiale möglich.

Für die Ermittlung von Zentralisierungspotentialen laufen im Modul zwei Prozesse ab, eine statische und eine dynamische Betrachtung. Die statische Betrachtung dient der Vorabfrage von Zentralisierungspotentialen und ist ein notwendiger Schritt zur Vereinfachung der Rechenroutine, womit der Simulationsablauf beschleunigt wird. Bei der statischen Betrachtung erfolgt die Kostenberechnung mit der Annahme der Maßnahmenumsetzung im ersten Betrachtungsjahr. Demzufolge werden die Anlagen und Leitungen zu den geltenden Randbedingungen zu diesem Zeitpunkt ausgelegt. Im Anschluss erfolgt die Integration der aus der statischen Betrachtung hervorgehenden Anlagenvorauswahl in die dynamische Betrachtung. Bei der dynamischen Kostenberechnung erfolgen die Maßnahmenumsetzung der KA-Stilllegung sowie der Bau der Überleitung erst zum Zeitpunkt, wenn die KA abgeschrieben ist. Zu diesem Zeitpunkt liegen ggf. unterschiedliche Randbedingungen vor als bei der statischen Betrachtung. Es erfolgt eine erneute Kostenermittlung, auf deren Basis ebenfalls eine erneute Überprüfung der Konzepte stattfindet. Unter Umständen können vorausgewählte Konzepte negiert werden.

Im Folgenden werden die wesentlichen Berechnungsabläufe der beiden Prozesse des Moduls *Zentralisierung* erläutert. In Abbildung 5-2 ist vereinfacht der Prozessablauf vom Rechenalgorithmus der statischen Betrachtung dargestellt. Dieser Prozess endet mit der Auswahl und Festlegung der Überleitungskonzepte in Form von Einzel- und Reihenüberleitungen. Einzelüberleitungen können durch die dynamische Betrachtung nur noch negiert werden. Reihenüberleitungskonzepte können sowohl bei der statischen als auch im Anschluss bei der dynamischen Betrachtung bei einer negativen Ökonomie abgelehnt werden. Ist dies der Fall, findet ein Kostenvergleich der sich in dem Konzept ergebenden Einzelüberleitungen statt.

## 5. Entwicklung und Implementierung von Maßnahmen



**Abbildung 5-2:** Schematische Darstellung des Prozessablaufs vom Rechenalgorithmus der statischen Betrachtung im Modul Zentralisierung

Zur Herleitung der jährlichen Gesamtkosten für die einzelnen KA-Standorte werden die Modell-eingangsdaten (Gebiets-, ökonomische und Objektdaten) verwendet. Basierend auf den Betriebskosten der KA und der Gegenüberstellung der zu diesem Standort gehörenden Betriebskosten des Überleitungskonzeptes erfolgt die Entscheidungsfindung der Maßnahmenumsetzung. In Tabelle 5-2 sind die für den Vergleich im Modell betrachteten Kostenpositionen aufgeführt.

## 5. Entwicklung und Implementierung von Maßnahmen

**Tabelle 5-2:** Betrachtete Kosten der Kostenarten für den Konzeptvergleich

Kostenart	Stillzulegende KA	Überleitung zur aufnehmenden KA
Personal	Wartungskosten	Wartungskostensteigerung KA
Betriebsstoffe	Energiekosten KA Laboranalysekosten	Energiekosten PWK Energiekostenveränderung KA Laboranalysekostensteigerung
Bezogene Leistungen	Schlammentsorgungskosten	Kanalreparaturkosten Kanalreinigung Schlammentsorgungskosten
Sonstige Aufwendungen	Abwasserabgabe	Abwasserabgabensenkung
Kapitalkosten (Zinsen, Abschreibung)	KA	PWK Kanal Ausbau KA
Erträge	Energieeinspeisung	Energieeinspeisung

Die Betriebskosten der Überleitungskonzepte ergeben sich aus den in Tabelle 5-2 enthaltenen Kostenpositionen. Der wesentliche Anteil folgt aus den Kapitalkosten durch die Investitionen in die notwendige Infrastruktur. Für die Maßnahmenumsetzung einer Überleitung bedarf es eines PWK, eines Überleitungskanals und, in Abhängigkeit von der Kapazität der aufnehmenden KA, eines Ausbaus des Standortes. Im ersten Schritt zur Dimensionierung dieser Infrastruktur erfolgt nach Ermittlung der optimalen Pumpenlaufzeiten und der Einschaltzahl die Festlegung der Fördermenge. Hierfür wird eine Matrix für die Fördermenge unter den Annahmen erzeugt, dass das Abwasser wegen anaerober Prozesse nicht länger als 24 Stunden vorgehalten werden darf und maximal 15 Pumpenanläufe in einer Stunde auftreten dürfen. Unter Erfüllung der Bedingungen wird der nächstgelegene Wert mit der Festlegung der dazugehörigen Fördermenge, Pumpenanläufe und Pumpenlaufzeit extrahiert. Basierend auf der ermittelten Fördermenge findet die Dimensionierung des Überleitungskanals statt. Zur Ermittlung der optimalen Rohrnennweite (DN) werden für die gängigen Nennweiten (100 - 1500) und die Spannweite in Frage kommender Fließgeschwindigkeiten (0,5 - 1,5 m s<sup>-1</sup>) die Rohrreibungsverluste in einer Matrix aufgetragen. Die Rohrreibungsverluste werden gemäß DWA-A-110 (2006) mittels der Darcy-Weisbach Gleichung nach (119) berechnet. Örtliche Verluste werden vernachlässigt.

$$h_{v(DN,v)} = \lambda \cdot \frac{L_{0L}}{d} \cdot \frac{v_{(n)}^2}{2g} \quad (119)$$

$h_{v(DN,v)}$	Verlusthöhe	(m)
$\lambda$	Rohrreibungszahl	(-)
$L_{0L}$	Überleitungslänge	(m)
$d$	Rohrinnendurchmesser (Rohrnennweite)	(m)
$v$	Fließgeschwindigkeit	(m s <sup>-1</sup> )
Re	Reynolds - Zahl	(-)

Die Reynolds-Zahl beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften und trifft eine Aussage über das Turbulenzverhalten. Für Rohrströmungen berechnet sie sich nach (120). Anhand der kritischen Reynolds-Zahl wird die Art der Strömung bestimmt. Nach Rotta (1956) gilt als Grenzwert eine Reynolds-Zahl von 2.320. Befindet sich der Wert darunter, liegt eine laminare, und befindet sich der Wert darüber, liegt eine turbulente Strömung vor. Ein abrupter Übergang zwischen laminarer und



turbulenter Strömung existiert nicht; vielmehr gibt es einen breiten Übergangsbereich der Strömungsverhältnisse. In Experimenten wurden bereits laminare Strömungen mit Reynolds-Zahlen von bis zu 50.000 (Schade et al. 1989) und 100.000 (Bergmann und Schaefer 2008) nachgewiesen.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (120)$$

$$\nu \quad \text{Kinematische Viskosität (Wasser = } 10^{-6} \text{)} \quad (\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$$

Die Rohrreibungszahl wird in Abhängigkeit von den Strömungsverhältnissen nach (121) ermittelt. Liegt eine laminare, voll ausgebildete Strömung vor ( $Re \leq 2320$ ), berechnet sie sich nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille. Die turbulente Strömung wird in einen glatten, rauen und einen dazwischenliegenden Übergangsbereich unterteilt. Zur genauen Berechnung der Rohrreibungszahl für hydraulisch glatte Rohroberflächen ohne Unebenheiten, wird in der Regel die Gleichung nach Prandtl angewandt. Im Modul erfolgt stattdessen eine näherungsweise Berechnung der Rohrreibungszahl anhand der Gleichung nach Blasius (1913). Für den Übergangsbereich zwischen dem hydraulisch glatten und rauen Bereich wird die Rohrreibungszahl nach der Gleichung von Colebrook-White bestimmt. Bei der Anwendung der iterativen empirischen Gleichung, wird modellseitig eine Zwei-Schritt-Iteration mit dem Startwert für die Rohrreibungszahl von 0,02 durchgeführt. Um einen möglichst breiten Bereich der Rauheit für das Material und dessen Zustand im Modul abbilden zu können, wurde basierend auf den Rauigkeits-Tabellen der Wert 0,5 vordefiniert. Die Grenze zwischen Übergangs- und hydraulisch rauem Bereich wird durch die Gleichung von Moody (1944) bestimmt (siehe Bedingung in Gl. 117). Für den hydraulisch rauen Bereich erfolgt die Berechnung der Rohrreibungszahl nach der Gleichung von Nikuradse (1933). Nach erfolgter Berechnung der Rohrreibungszahl des Übergangs- und des rauen Bereiches findet eine Überprüfung des Ergebnisses gegen den Grenzwert nach Moody statt. Bei Nichterfüllung der Bedingung erfolgt eine erneute Berechnung für den jeweils anderen hydraulischen Bereich.

$$\lambda = \begin{cases} \frac{64}{Re} ; \text{laminar wenn } Re \leq 2320 \\ \frac{0,3164}{Re^{0,25}} ; \text{turbulent, glatt wenn } 2320 \leq Re \leq 10^5 \\ \left( \frac{1}{-2 \cdot \lg \left( \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot d} \right)} \right)^2 ; \text{turbulent, Übergang wenn } Re \leq 10^5 \wedge \frac{1}{\lambda} < \frac{Re}{200} \cdot \frac{k}{d} \\ \left( \frac{1}{-2 \cdot \lg \left( \frac{k}{3,71 \cdot d} \right)} \right)^2 ; \text{turbulent, rau wenn } Re \leq 10^5 \wedge \frac{1}{\lambda} > \frac{Re}{200} \cdot \frac{k}{d} \end{cases} \quad (121)$$

$k$                       Rohrrauigkeit                      (m)

Basierend auf der Dimensionierung der optimalen DN erfolgt über die längenspezifischen Kosten und Überleitungslänge die Kalkulation der Gesamtinvestitionskosten. Die längenspezifischen Kosten können gemäß (122) optional anhand eines Eingabewertes festgesetzt oder mittels der materialunabhängigen Kostenfunktion von Horstmeyer et al. (2014) hergeleitet werden. Die Länge der Überleitung ergibt sich aus der Triangulation zwischen den Standorten. Dabei werden die ermittelten Entfernungen als lineare Strecke für die Überleitungskanäle angenommen.

$$k_{\text{KanNeu, spez}} = \begin{cases} k_{\text{KanNeu, spez}} & ; \text{wenn } \exists(k_{\text{KanNeu, spez}}) \\ 249,42 \cdot \exp^{0,001 \cdot \text{DN}} & ; \text{wenn } \neg \exists(k_{\text{KanNeu, spez}}) \end{cases} \quad (122)$$

Die ermittelten Überleitungslängen werden dem Modul *SWEN* übertragen. Aus den Alterungsfunktionen hergeleiteten Kanalzustandsklassen werden die zusätzlichen Instandhaltungskosten für Erneuerung bzw. Sanierung und Reparatur berechnet. Hinsichtlich der neuerrichteten Kanalleitung entstehen Instandhaltungskosten erst über einen längeren Zeitraum. Zur Berücksichtigung dieser Kosten wurden für die statische Betrachtung die mittleren jährlichen Kosten über den Betrachtungszeitraum unter Berücksichtigung der Sanierungsquote einbezogen. Über die angegebene Kanalreinigungsquote und den angegebenen längenspezifischen Kosten werden die Kanalreinigungskosten kalkuliert.

Aus der Summe der Verlusthöhe und der geometrischen Höhe resultiert die manometrische Höhe. Die jährliche Pumpleistung der Förderanlage für das Überleitungskonzept berechnet sich nach (123) aus der manometrischen Höhe, der zu fördernden Jahresabwassermenge und dem Wirkungsgrad der Pumpe.

$$P_{\text{Pump}} = \frac{\rho_W \cdot g \cdot Q_{a(n,t)} \cdot H_{\text{mano}}}{1000 \cdot \eta_{\text{Pump}}} \quad (123)$$

$P_{\text{Pump}}$	Jahresförderleistung Pumpstation	(kWh)
$\rho_W$	Dichte von Wasser ( $\approx 1000$ )	(kg m <sup>-3</sup> )
$g$	Gewichtskraft (9,81)	(m s <sup>-2</sup> )
$Q_a$	Jahresabwassermenge	(m <sup>3</sup> )
$H_{\text{mano}}$	Manometrische Förderhöhe	(m)
$\eta_{\text{Pump}}$	Wirkungsgrad Pumpe	(-)

Die in Abhängigkeit von der manometrischen Förderhöhe und Pumpenfördermenge spezifischen Investitionskosten für die Pumpstation werden anhand der Kostenfunktion von Horstmeyer et al. (2014) nach (124) ermittelt. Aus den spezifischen Kosten werden dann die Investitionskosten abgeleitet.

$$k_{\text{Pump}} = 45,484 \cdot (Q_{p,\text{opti}} \cdot H_{\text{mano}})^{-0,708} \quad (124)$$

$$k_{\text{Pump}} \quad \text{Spezifische Kosten PWK} \quad (\text{€ l}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1})$$

Ergibt sich aus der Kapazitätsprüfung auf Grundlage der aktuellen nominalen Auslastung der aufnehmenden KA, dass die Kapazität nicht ausreicht, um die Abwassermenge aufzunehmen, findet ein Ausbau statt. Die pauschalen Investitionskosten für den kapazitiven Ausbau werden basierend auf

den Kostenfunktionen des Moduls *KA* hergeleitet. Führt der *KA*-Ausbau zu einer Erhöhung der GK verändert sich der Wartungs- und Parameteranalyseaufwand. Auch die Anforderungen an das Abwasser für die Einleitungsstelle verschärfen sich in Form von niedrigeren Grenzwerten. Liegen die Grenzwerte der Abwasserverordnung unterhalb des aktuellen nominalen Überwachungswertes, so werden die Grenzwerte statt derer gesetzt. Dies hat modellseitig eine Auswirkung auf den Fällmittelverbrauch, auf die Schlammengen und die Schadeinheiten. Die Quantifizierung dieser Auswirkungen erfolgt durch das Modul *KA*.

Im Modul *KA* findet die Betrachtung der Effekte für die aufnehmende *KA* hinsichtlich der überzuleitenden zusätzlichen Abwassermengen der stillzulegenden *KA* statt. Unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Verfahrenstechnik der aufnehmenden *KA* werden die prozessbasierten Parameter für den Energieverbrauch, Fällmitteleinsatz, die Schlammengenproduktion und - ggf. bei einer Faulung - die Energieerzeugung sowie die damit verbundene Energiebilanzierung neu berechnet. Durch den Anstieg der EW bei der aufnehmenden *KA* steigt dort der Energieverbrauch. In Abhängigkeit vom Energieverbrauch der stillzulegenden *KA* kann dies zu einer Minderung oder Erhöhung in der Gesamtbilanz des Energieverbrauchs der betroffenen *KA* führen. Existiert am Standort der aufnehmenden *KA* eine Faulung, erfolgt durch die zusätzliche Abwassermenge eine Steigerung der erzeugten Energiemenge. Ist der Eigenbedarf an elektrischer Energie bereits gedeckt, führt dies zur Erhöhung des Ertrags durch Einspeisung elektrischer Energie. Anderenfalls wird mit der zusätzlichen Energiemenge die elektrische Energiezufuhr aus dem Netz gesenkt. Bei gleichen Überwachungswerten für *P* zwischen der aufnehmenden und stillzulegenden *KA* verändert sich der Fällmittelverbrauch in der Gesamtbilanz der betroffenen *KA* nicht. Durch die zusätzlichen Abwassermengen steigt der Fällmittelverbrauch bei der aufnehmenden *KA* generell an. Liegen jedoch unterschiedliche Überwachungswerte bedingt durch die GK oder dem Vorfluter vor, führt dies auch zu einer Veränderung des Fällmitteleinsatzes in der Gesamtbilanz der *KA*. Im Regelfall wird die aufnehmende *KA* der gleichen bzw. höheren GK angehören. Bei einem evtl. daraus folgenden niedrigeren Überwachungswert werden sich die Fällmittelverbräuche in der Gesamtbilanz erhöhen. Neben der Veränderung der *P*-Fracht haben die unterschiedlichen Verfahrenstechniken und Überwachungswerte der Anlagen außerdem einen Einfluss auf die CSB- und *N*-Fracht. Demzufolge hat dies auch eine Auswirkung auf die Schadeinheiten sowie die resultierende Abwasserabgabe. Die Schlammproduktion wird im Modell sowohl durch die Veränderung der Fällmittelmengen als auch durch die Verfahrenstechnik der Schlammstabilisierung beeinflusst.

Für die Erstellung der Kostenmatrix werden für sämtliche Einzelüberleitungskombinationen die Betriebskosten hergeleitet. Diese werden den Betriebskosten der gegenwärtigen Abwasserbehandlung gegenübergestellt. Das Konzept mit den geringeren Betriebskosten wird in der Gegenüberstellung als Vorzugsvariante gewählt. Aus der Auswahl der bestätigten Einzelüberleitungskonzepte je Standort wird die Überleitung mit den geringsten Kosten ausgewählt. Basierend auf dem Betriebskostenvergleich und unter Einhaltung der Bedingungen wird für jede *KA* die ökonomischste Überleitungsvariante bestimmt. Besteht im Ergebnisarray zwischen zwei *KA* auf beiden Seiten eine Überleitung wird die Überleitungsrichtung durch die Kosten bestimmt. Ergibt sich eine Reihenschaltung durch Einzelverbindungen sind die Überleitungen hinsichtlich der sich aufsummierenden Abwassermengen

und der damit verbundenen Dimensionierung der Pumpstationen und Überleitungskanäle neu zu berechnen. Die aus der neuen Dimensionierung resultierenden Kosten werden der Summe der gegenwärtigen Kosten der betreffenden Standorte gegenübergestellt. Fallen die Kosten des Überleitungskonzeptes höher aus, so wird dieses verworfen. Ist für die betreffenden KA in einem Cluster, welches sich durch das Überleitungskonzept ergibt, keine Reihenschaltung vorgegeben erfolgt mittels Kombinatorik die Überprüfung auf sinnvolle Reihenschaltungen innerhalb des Clusters. Mit der Anzahl von KA in einem Cluster erhöhen sich die möglichen Kombinationen nach (125) um die in Tabelle 5-3 aufgeführten Anzahlen.

$$K_{0L} = \sum_{k=2}^N \left( \frac{N!}{(N-k)! \cdot k!} \right) + 1 \quad (125)$$

$K_{0L}$	Anzahl Kombinationen von Überleitungen	(-)
$N$	Anzahl KA im Verbund der Reihenschaltung	(-)
$k$	Ausgewählte KA im Verbund der Reihenschaltung	(-)

**Tabelle 5-3:** Anzahl an Verbindungskombinationen in Abhängigkeit von der KA-Anzahl in der Reihenschaltung

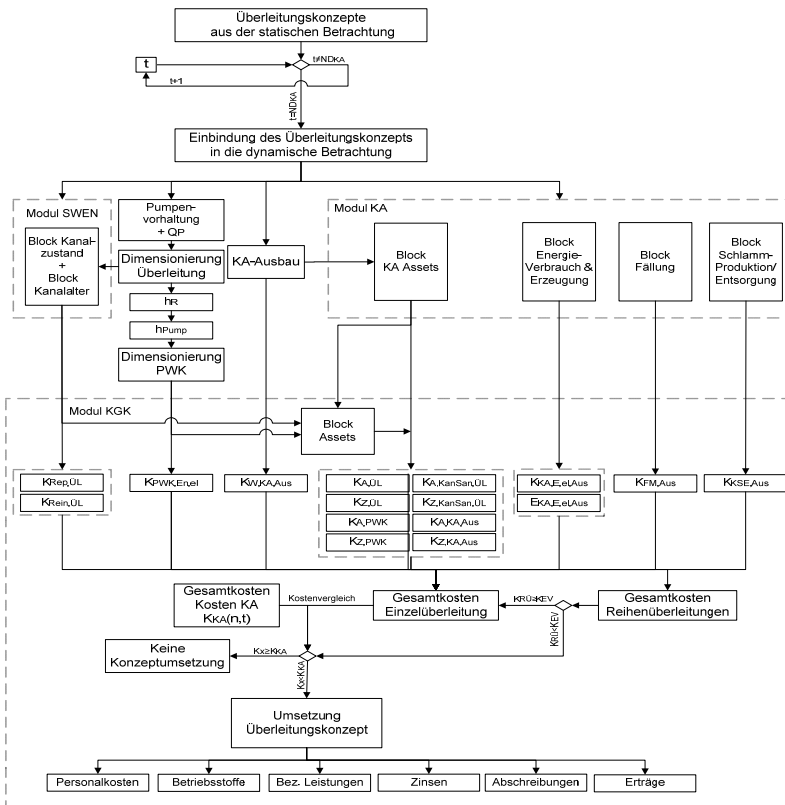
Anzahl KA $N$	Anzahl Kombinationen $K_{0L}$
1	1
2	3
3	13
4	61
5	321
6	1.951
7	13.693
8	109.593
9	986.401
10	9.864.091
11	108.505.101
12	1.302.061.333
13	16.926.797.473

Bei der Kombinationsanzahlermittlung werden zunächst sämtliche Kombinationen unter Berücksichtigung aller im Verbund für eine Reihenschaltung stehenden KA ( $N$ ) betrachtet ( $k=N \triangleq N!$ ). Anschließend wird die Auswahl ( $k$ ) der in der Reihenschaltung befindlichen KA von  $N$  jeweils um eins reduziert (bis  $k=2$ ). Der Fall der Betrachtung ohne Überleitungen ( $k=1$ ) wird in der Zählung ausgelassen, da jede KA im Verbund als eine Kombination gezählt wird. Stattdessen wird dieser Fall, bei welchem alle KA bestehen bleiben, als eine Kombination betrachtet, weshalb die Zählung um eins ergänzt wird. Mit steigender Anzahl der im betrachteten Verbund der Reihenschaltung befindlichen KA steigt die Anzahl der Kombinationen logarithmisch an. In Abhängigkeit von der Rechenleistung ergibt sich daraus eine Einschränkung in der Durchführung des Rechenalgorithmus. Unter Umständen führt dies zu sehr langen Rechenzeiten. Eine vorherige Auswertung des Ergebnisarrays ist bei einer hohen Anzahl von KA im Entsorgungsgebiet empfehlenswert. Gegebenenfalls ist ein Rechenabbruchskriterium (z.B. ab  $N > 8$ ) zu integrieren. Basierend aus den Kombinationen entsteht die Kostenmatrix für Reihenüberleitungen, aus welcher die kostengünstigste Vorzugsvariante ermittelt wird. Die

## 5. Entwicklung und Implementierung von Maßnahmen

Betriebskosten der Vorzugsvariante werden der Summe der Betriebskosten von den Einzelüberleitungen der betreffenden KA gegenübergestellt. Fallen die Betriebskosten des Überleitungskonzeptes höher aus, als dass der Einzelüberleitungen, so wird dieses verworfen und die Einzelüberleitungen werden favorisiert.

Mit der Festlegung der Überleitungskonzepte und der damit verbundenen Zuordnung der KA ist die statische Betrachtung des Anpassungsmaßnahmenmoduls *Zentralisierung* beendet. Im nächsten Schritt erfolgt die Integration dieser Konzepte in die dynamische Betrachtung unter Einbeziehung der Nutzungsdauer der Sachanlagenwerte und den veränderlichen Rahmenbedingungen. Eine vereinfachte schematische Übersicht des Rechenalgorithmus der dynamischen Betrachtung ist in Abbildung 5-3 dargestellt.



**Abbildung 5-3:** Schematische Darstellung des Rechenalgorithmus der dynamischen Betrachtung im Modul Zentralisierung

Der Berechnungsablauf der dynamischen Betriebskostenherleitung für die Überleitungskonzepte steht in Analogie zur statischen Betriebskostenherleitung. Zum Zeitpunkt der Restbuchwertauflösung und der Beendigung der Nutzung erfolgen für die betreffenden KA die Stilllegung und die Überleitung zur aufnehmenden KA. Für die Dimensionierung der Anlagen werden in der dynamischen Betrachtung die für diesen Zeitpunkt aktuellen Einwohnerwerte und Abwassermengen mit einbezogen. Bezogen auf diese Werte erfolgt eine erneute Herleitung für die aktuellen Betriebskosten, sowohl für die bestehenden Standorte als auch für das Überleitungskonzept. Bei einer Reduzierung der Abwassermengen resultiert ggf. eine Verringerung der Kosten durch kleinere Rohrdurchmesser, Pumpstationen mit einer geringeren Leistung sowie ein nicht mehr notwendiger, in der Vorbetrachtung aber eingeplanter, Ausbau der aufnehmenden KA. Neben den Investitionskostenveränderungen für die Umsetzung der Überleitungen gibt es auch Effekte auf die Betriebsprozesse der aufnehmenden KA, welche im Modul *KA* betrachtet werden. Aus dem Modul *SWEN* werden die Kanalreinigungs- und Reparaturkosten der Überleitungen bezogen. Die aktuellen Betriebskosten des Standortes werden der Vorabberechnung der Prognosesimulation entnommen. Bei der dynamischen Betrachtung haben vor allem ökonomische, inflationäre Einflüsse einen bedeutenden Effekt auf die Kosten beider miteinander zu vergleichenden Konzeptvarianten. Liegen unterschiedliche Anteile bezüglich der Investitionskosten bei den Konzepten vor, kommt es mit fortschreitender Zeit durch die Inflation zu einer Verschiebung bei den Betriebskosten aufgrund steigender Kapitalkosten. Zur Annahme der Einzel- als auch Reihenüberleitungskonzepte in der dynamischen Betrachtung erfolgt eine erneute Gegenüberstellung der Betriebskosten, bei welcher die ökonomischste Variante gewählt wird. Dies kann zum Ausschluss von zuvor in der statischen Betrachtung bestätigten Überleitungskonzepten führen. Erfolgt eine Annahme des Überleitungskonzepts, werden für den jeweiligen Standort die prozessbasierten Parameter überschrieben. Die Sachanlagenwerte in Form von Kanalleitungen, PWK als auch ggf. KA-Erweiterungen werden in den Modulen *SWEN* und *KA* eingebucht und fortlaufend mitbetrachtet. Basierend auf den prozessbasierten Parametern findet im Modul *KGK* eine Neuberechnung und Überschreibung der betreffenden Kosten in den Kostenarten statt. Hierfür werden die Kosten des Standortes herausgerechnet und durch die Kosten des Überleitungskonzeptes ergänzt.

### 5.4 Zusammenschluss von Aufgabenträgern

Im Anpassungsmaßnahmenmodul *Zusammenschluss* können die Zusammenschlussformen *Kooperation* und *Fusion* für zwei oder mehr Aufgabenträger betrachtet werden. Für die Betrachtung der Kooperationseffekte findet eine Verschneidung der Gebiets-, Objekt- und Infrastrukturdaten statt. Bei der Kooperation wird angenommen, dass die Aufgabenträger eigenständige Körperschaften bleiben und allenfalls die Verwaltungen einen Kooperationsvertrag eingehen. Aus diesem Grund bleiben die ökonomischen Daten der Aufgabenträger separiert. Der Stellenabbau im Anpassungsmodul erfolgt im Kontrast zur Realität statt über das altersbedingte Ausscheiden direkt im Jahr der Maßnahmenumsetzung, dadurch werden die Einsparungen direkt wirksam und zeigen über den Betrachtungszeitraum das Gesamtpotential an Einsparungen. Hierfür wird angenommen, dass durch Optimierung und Synergien in den Prozessabläufen die Personalstärke der größeren Verwaltung ausreicht um die Aufgaben der kleineren zu übernehmen. Die Personalkosten der Kooperationsverwaltung werden EW-anteilig auf den betrachteten Aufgabenträger übertragen. Durch die

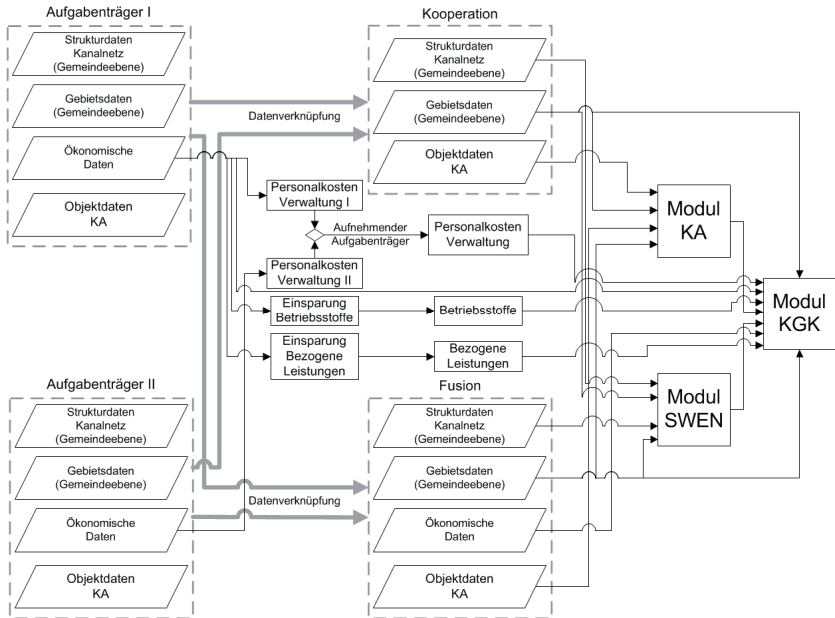
koordinierte Materialbeschaffung und Bündelung von Dienstleistungen und Lizenzverträgen ergeben sich weitere Einsparungspotentiale.

Bei einer Fusionierung wird in der Modellbetrachtung ein neuer Aufgabenträger gebildet. Dabei wird vereinfachend die Erstellung einer neuen Gebührenordnung angenommen. Es erfolgt neben der Verschneidung der Gebiets-, Objekt- und Infrastrukturdaten auch eine Verschneidung der Finanzdaten. Dadurch entsteht aus den diskreten Kostenstrukturen der beteiligten Aufgabenträger eine gemeinsame Kostenstruktur des neuen Aufgabenträgers. Alle Kostenarten, außer den Personalkosten, werden aufaddiert. Die Personalkosten werden separiert nach den drei Kostenstellen betrachtet. Personalkosten der Kostenstellen Behandlungsanlagen und Kanalnetz werden ebenfalls aufaddiert, da hier keine Personaleinsparungen angenommen werden. Für den Bereich der Verwaltung werden auf gleicher Weise wie bei der Kooperation die Personalkosten unter Annahme einer aggressiven Personalreduzierung ermittelt. In Anlehnung an die Kooperationsbetrachtung werden die Einsparungen bei Materialkosten und sonstigen Aufwendungen auch hier generiert. Die Sachanlagenwerte als auch die Verbindlichkeiten werden übertragen und werden in der neuen Bilanz in der Aktiva und Passiva abgebildet.

Im Anschluss der Datenverschneidung erfolgt unabhängig von der Betrachtung, ob Kooperation oder Fusionierung, die Übergabe der Informationen an die Module *KA*, *SWEN* und *KGK*. Durch die objektbezogene Betrachtung im Modul *KA* ergeben sich außer der KA-Anzahl keine Veränderungen hinsichtlich der prozessbezogenen Parameter. Modul *SWEN* betrachtet das gesamte Kanalnetz als eine Einheit, demnach beeinflussen sich die Netze der Aufgabenträger vom Alter als auch vom Zustand. Die prozessbasierten Parameter werden aus den beiden anderen Modulen dem Modul *KGK* übergeben, in welchem die Herleitung der Kosten und Gebührenberechnung stattfindet.

Mit dem Anpassungsmaßnahmenmodul *Zusammenschluss* ist eine Kombination mit weiteren Anpassungsmaßnahmen durchführbar. Dies betrifft insbesondere Maßnahmen, bei welchen sich Synergien und Einsparungen durch eine Vergrößerung der Infrastruktur ergeben, wie in den beiden zuvor beschriebenen Anpassungsmaßnahmen.

Die Berechnungsabläufe des Anpassungsmaßnahmenmoduls *Zusammenschluss* sind in Abbildung 4-27 vereinfacht dargestellt.



**Abbildung 5-4:** Schematische Darstellung der Berechnungsabläufe im Modul Zusammenschluss

Folgend werden die wesentlichen Berechnungsabläufe des Moduls *Zusammenschluss* eingehender betrachtet. Die Maßnahmenumsetzung erfolgt modellseitig im ersten Jahr der Prognose. Im Gegensatz zum arbeitnehmerfreundlichen altersbedingten Personalabbau über einen weiten Zeitraum erfolgt der Personalabbau direkt bei der Maßnahmenumsetzung. Für die Berechnung der Personalkosten in der Verwaltung werden die maximalen Verwaltungskosten zum Zeitpunkt des Bezugsjahres der fusionierenden Aufgabenträger ermittelt. Die Ermittlung des Anteils an den Personalkosten für den betrachteten Aufgabenträger bei einer Kooperationsverwaltung ergibt sich nach (126) über das EW-Verhältnis zu den Personalkosten der größeren Verwaltung. Nach (127) erfolgt die Verwaltungs-personalkostenberechnung einer Fusionierung. Bei beiden Berechnungswegen wird die Gehaltsanpassungsrate berücksichtigt. Zur Berechnung der Gesamtpersonalkosten nach Maßnahmenumsetzung wird bei einer Kooperation nach (128) die Differenz aus den im Vorfeld ermittelten Gesamtpersonalkosten des betrachteten Aufgabenträgers und den Verwaltungskosten der *Kooperation* gebildet und von den ursprünglichen Gesamtpersonalkosten abgezogen. Bei der *Fusion* werden die Personalkosten der Kostenstellen *Behandlungsanlagen* und *Kanalnetz* aufaddiert und um die ermittelten Verwaltungspersonalkosten ergänzt, womit sich für den neugebildeten Aufgabenträger neue Gesamtpersonalkosten ergeben. Diese unterliegen ebenfalls der vorab definierten Gehaltssteigerung.



## 5. Entwicklung und Implementierung von Maßnahmen

$$K_{P,V,Ko(t)} = \begin{cases} \max(K_{P,V,Ag}(1, :)) \cdot \frac{N_{EW,bAg}(1,n)}{N_{EW,Ges,Ag}(1)} \cdot (1 + r_G) \\ K_{P,V,Ko(t)} = K_{P,V,Ko(t-1)} \cdot (1 + r_G); \text{ wenn } t > 2 \end{cases} \quad (126)$$

$K_{P,V,Ko}$	Personalkosten Verwaltung Kooperation	(€)
$K_{P,V,Ag}$	Personalkosten Verwaltung Zusammenschluss	(€)
$N_{EW,Ag}$	Einwohnerwerte betrachteter Aufgabenträger	(EW)
$N_{EW,Ges,Ag}$	Einwohnerwerte aller Aufgabenträger Zusammenschluss	(EW)
$r_G$	Gehaltsanpassungsrate	(-)

$$K_{P,V,Fu(t)} = \begin{cases} \max(K_{P,V,Ag}(1, :)) \cdot (1 + r_G) \\ K_{P,V,Fu(t)} = K_{P,V,Fu(t-1)} \cdot (1 + r_G); \text{ wenn } t > 2 \end{cases} \quad (127)$$

$K_{P,V,Fu}$	Personalkosten Verwaltung neugebildeter Aufgabenträger	(€)
--------------	--	-----

$$K_{P(t)} = \begin{cases} K_{P(t)} - (K_{P,V(t)} - K_{P,V,Ko(t)}) ; \text{ wenn Kooperation} \\ (K_{P,KA,Ges,Fu(t)} + K_{P,Kan,Fu(t)} + K_{P,V,Fu(t)}) \cdot (1 + r_G) ; \text{ wenn Fusion} \end{cases} \quad (128)$$

$K_P$	Gesamtpersonalkosten betrachteter Aufgabenträger	(€)
$K_{P,V}$	Personalkosten Verwaltung betrachteter Aufgabenträger	(€)
$K_{P,KA,Ges,Fu}$	Personalkosten Kostenstelle Behandlungsanlagen fusionierter Aufgabenträger	(€)
$K_{P,Kan,Fu}$	Personalkosten Kostenstelle Kanalnetz fusionierter Aufgabenträger	(€)

Einsparungen, welche sich bei beiden Arten der Zusammenschlüsse durch die koordinierte Materialbeschaffung und Bündelung von Dienstleistungen und Lizenzverträgen ergeben, werden für die Kostenarten *Betriebsstoffe* (129), *bezogene Leistungen* (130) sowie *sonstige Aufwendungen* (131) pauschal über Einsparungsraten berechnet.

$$K_{B(t)} = K_{B(t)} \cdot (1 - r_{Einspar,B}) \quad (129) \quad K_{L(t)} = K_{L(t)} \cdot (1 - r_{Einspar,L}) \quad (130)$$

$$K_{sAw(t)} = K_{sAw(t)} \cdot (1 - r_{Einspar,sAw}) \quad (131)$$

$K_B$	Betriebsstoffe	(€)
$K_L$	Bezogene Leistungen	(€)
$K_{sAw}$	Sonstige Aufwendungen	(€)
$r_{Einspar,B}$	Einsparrate Betriebsstoffe	(-)
$r_{Einspar,L}$	Einsparrate bezogene Leistungen	(-)
$r_{Einspar,sAw}$	Einsparrate sonstige Aufwendungen	(-)

Basierend auf den neu kalkulierten Kosten in den einzelnen Kostenarten erfolgt wie in Kap. 4.4.3 beschrieben die Gebührenkalkulation für beide Arten des Zusammenschlusses.

## **6. Parameteranpassung und Modellvalidierung anhand eines beispielhaften Aufgabenträgers in M-V**

Für die Prognosesimulation mit dem Modell hat zur Erhöhung der Modellgüte eine Parameteranpassung vorab zu erfolgen, um einen digitalen Abgleich vom betrachteten Aufgabenträger und dessen Anlagen und Strukturen zu ermöglichen. Hierfür wurde ein beispielhafter Aufgabenträger aus der Region von M-V ausgewählt und zusätzliche Daten erhoben. Im Folgenden wird die technische Infrastruktur dieses Aufgabenträgers näher beschrieben, doch aus Gründen der Anonymität werden keine namentlichen Bezeichnungen genannt und Ortsangaben bekannt geben. Bei der modellhaften Abbildung des Aufgabenträgers mussten lokale Besonderheiten sowohl bei der Abwassermatrix als auch bei der KA-Technik Berücksichtigung finden. Die Vorgehensweise bei der Integration von nicht im Modell enthaltenen Anlagenspezifika und deren Umsetzung wird erläutert und ausführlich dargestellt. Des Weiteren werden die Resultate der Parameteranpassung als auch die der Validierung der technischen und ökonomischen Kenngrößen in den folgenden Kapiteln präsentiert.

### **6.1 Beschreibung des exemplarischen Aufgabenträgers**

Hinsichtlich der Vertraulichkeit der Daten und Ergebnisse wurde Anonymität mit dem Aufgabenträger vereinbart. Es handelt sich um einen Aufgabenträger, welcher die Region M-V hinsichtlich der fragmentierten Siedlungsstruktur, der demografischen Herausforderungen und Infrastruktur repräsentiert. In der heutigen Struktur und Gebietsfläche existiert der Aufgabenträger seit 2001. Das Entsorgungsgebiet umfasst 60.915 ha, wovon 18.218 ha Siedlungsfläche sind, welche sich aus drei Kleinstädten und 17 weiteren kleineren Gemeinden zusammensetzt. Eine Besonderheit in diesem Entsorgungsgebiet ist das hohe Gewerbe- und Industrieaufkommen. Von der Gesamtkapazität der 14 KA, welche 206.500 EW entspricht, stammt der Schmutzwasseranteil der Bevölkerung von lediglich 19.600 Haushalten (StatA M-V 2016a). Bei Annahme eines durchschnittlichen Zwei-Personen-Haushaltes (ZPH) entspräche dies 39.200 E. Der restliche Anteil entstammt aus dem Gewerbe und der Industrie. Im Jahr werden im gesamten Gebiet ca. 1,695 Mio. m<sup>3</sup> Schmutzwasser behandelt. Die Schmutzwasserentwässerung der Haushalte erfolgt, wie in der Region typisch, durch eine Trennkanalisation. Insgesamt umfasst das Abwasserentwässerungssystem eine Länge von 373 km an Leitungen und Kanälen. Dabei beträgt der Mischwasserkanalisationsanteil am Gesamtsystem 3,3 %. Das SWEN besitzt eine Länge von 279 km. Der Anschlussgrad an das zentrale Entsorgungssystem beträgt im Gebiet 77 %. Hinsichtlich der Investitionswelle für die Modernisierung der Abwasserinfrastruktur der vergangenen 20 Jahre, handelt es sich bei einer Nutzungsdauer von 50 bis 70 Jahren, mit einem mittleren Alter von 16 Jahren, um ein junges Entwässerungsnetz, welches sich der Annahme nach in einem guten Zustand befindet. Mit einer Nutzungsdauer von 20 bis 25 Jahren, befinden sich viele der KA in den nächsten Jahren in einem erneuten Reinvestitionszyklus.

## **6.2 Zusätzlich erhobene Daten für die Parameteranpassung und Validierung sowie zu berücksichtigende Besonderheiten des Aufgabenträgers bei der Modellierung**

Für die Validierung kann auf einen Zeitraum von 14 Jahren zwischen 2001 und 2014 zurückgegriffen werden. Hierfür wurden die technischen und ökonomischen Daten vom Ausgangspunkt und vom Endpunkt des Validierungszeitraumes erhoben. Im Rahmen der technischen Daten wurden für die KA die Eingangsparameter für das Modul KA (Zu-/ Ablaufwerte von CSB, P, N, Jahresabwasser- und Schmutzwassermengen) sowie die angefallenen *Klärschlammengen*, *Fällmittelmengen* und *Energieverbräuche* erhoben. Für das Jahr 2001 waren diese Daten in Bezug auf die *Klärschlammengen* und *Energieverbräuche* nicht vollständig. Aus diesem Grund wurden zur Anpassung der prozessbasierten KA-Parameter die Daten von 2014 verwendet. Technische Daten des Kanalnetzes lagen nur bedingt vor. Diesbezüglich waren nur die Kanalreinigungsrate sowie Sanierungs- und Neerschließungsquote vorliegend. Daten über die Kanalzustände lagen nicht vor, stattdessen wurden als Ersatz die relativen Anteile der *Kanalzustandsklassen* aus zwei Studien auf das Kanalnetz des Aufgabenträgers übertragen. Basierend auf der hergeleiteten Datengrundlage wurden die Herz-Überlebensfunktionen des Alterungsmodells angepasst. Die wirtschaftlichen Daten der einzelnen Kostenarten wurden den jeweiligen Jahresabschlussberichten entnommen. Zudem wurden die Kosten für *Betriebsstoffe* und *bezogenen Leistungen* der einzelnen Jahre, welche sich aus den prozessbasierenden Parametern ergeben, abgefragt. Auf diese Weise können diese Kosten ebenfalls mit den Simulationsergebnissen verglichen werden.

Bedingt durch den Rechenalgorithmus des Modells lassen sich finanztechnische und strukturelle Veränderungen innerhalb des Betrachtungszeitraumes nicht ändern. Dies betrifft unter anderem auch die gebührenwirksame *Auflösung von Beiträgen und Fördermitteln*. Mit der Festlegung vor Simulationsbeginn, dass Beiträge erhoben und Fördermittel generiert werden, findet modellseitig eine Auflösung statt. Wenn es innerhalb des Betrachtungszeitraumes zu einer Umstellung dieser Modalitäten kommt, sind entweder der Restbuchwert der aufzulösenden *Beiträge und Fördermittel* zu gering kalkuliert oder zu hoch bemessen. Dieser spezielle Fall trifft für die Untersuchung zu. Mit der Aktualisierung des KAG M-V in 2006 bestand für die Aufgabenträger die Möglichkeit, erhaltene Beiträge und Fördermittel gebührenwirksam aufzulösen. Dies betrifft auch den betrachteten Aufgabenträger, welcher seit 2006 die *Beiträge und Fördermittel* gebührenwirksam auflöst. Durch den Umstand, dass das Jahr in dem mit den Auflösungen begonnen wurde, mitten im Simulationszeitraum der Validierung liegt, wurden diese in der Simulation nicht berücksichtigt. Um die Genauigkeit der durch das Modell simulierten Gebühren validieren zu können, mussten diese im Anschluss der Simulation um die fehlenden Beträge der gebührenmindernden Auflösungen bereinigt werden.

Der Rechenalgorithmus des Moduls KA wurde basierend auf den öffentlich zugänglichen Daten des LUNG konzipiert. Hinsichtlich des geringen Detailierungsgrades der enthaltenen Informationen über die Anlagen, können technisch komplexe Besonderheiten nicht mit abgebildet werden. Doch können standortspezifische technische Besonderheiten durch Korrekturwerte in den Datentabellen oder im Modell selbst Berücksichtigung finden. Auch bei dem für die Validierung herangezogenen exemplarischen Aufgabenträger erfolgen zur Berücksichtigung von maßgebenden kostenrelevanten Besonderheiten Korrekturen. Dies betrifft die größte aller KA innerhalb des Entsorgungsgebietes. Das

## 6. Parameteranpassung und Modellvalidierung anhand eines beispielhaften Aufgabenträgers in M-V

Besondere an dieser Anlage ist der industrielle Schmutzwassermengenanteil in Bezug zur gesamten kommunalen Schmutzwassermenge. Dieser Anteil wird durch einen Einleiter über einen Bypass der Anlage zugeführt. Da diese Einleitung erst nach der VK erfolgt, enthält die in den LUNG-Daten angegebene Abwassermenge diesen Anteil sowie die damit verbundenen Stoffkonzentrationen nicht. Der Schmutzwassermengenanteil des Indirekteinleiters beträgt im Zulauf des Bypasses (nach dem UASB) 24 %, der Gesamtfrachtanteil am CSB 8 %, an N 84 % und an P 60 %. Hinsichtlich des maßgebenden Einflusses auf die Kosten, ist es für die Gesamtbetrachtung des Aufgabenträgers unerlässlich, diesen Stoffstrom mit zu berücksichtigen. Hierfür wurden die Ausgangsdaten bezogen auf den zusätzlichen Indirekteinleiter korrigiert. Dies erfolgte anhand einer inversen Stoffstrombetrachtung der KA anhand von erhaltenen Daten bezgl. Stoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der KA als auch Einleitwerte des industriellen Indirekteinleiters. Für die inverse Berechnung wurden Standardwerte für die stofflichen Abbauleistungen in der KA gemäß DWA-A-131 (2016) und im UASB-Reaktor nach DWA (2016) angewendet (für die UASB Bemessung siehe Anhang 8). Die relevanten Parameterwerte aus dieser Betrachtung sind in Tabelle 6-1 abgebildet.

**Tabelle 6-1:** Konzentrationen der Schmutzwasserströme

	Q (m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> )	C <sub>CSB</sub> (mg l <sup>-1</sup> )	C <sub>N</sub> (mg l <sup>-1</sup> )	C <sub>P</sub> (mg l <sup>-1</sup> )
Zulauf VKg <sup>1)</sup>	1.110.934	2.878	43,5	21,9
Ablauf VK	1.110.934	1.727	39,2	19,7
+ Indirekteinleiter Industrie <sup>2)</sup>	414.000	600	234	30
Nach Durchmischung (hinter VK)	1.524.934	1.421	92	22,5
+ Inverse Betrachtung Zulauf VK	1.524.934	947	9	2,5
Korrigierte Zulaufwerte VK	1.524.934	2.368	101	25,0

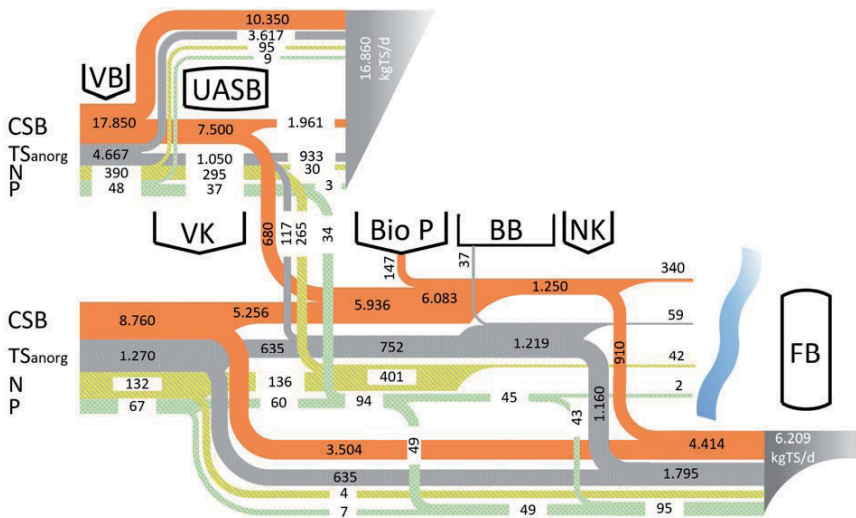
<sup>1)</sup>Daten vom LUNG in Abgleich mit dem exemplarischen AZV

<sup>2)</sup>Angaben des exemplarischen AZV

Der Jahresvolumenstrom dieser Anlage wurde um den Schmutzwasseranteil des industriellen Indirekteinleiters (414.000 m<sup>3</sup> a<sup>-1</sup>) erhöht. Daraus resultiert eine Jahresschmutzwassermenge von insgesamt 1.524.934 m<sup>3</sup> a<sup>-1</sup>. Damit die zusätzliche Fracht im Modul KA berücksichtigt wird, findet mittels einer Durchmischungsrechnung und mit Einbeziehung der Reduktionsleistung der VK (40 % für CSB und 10 % für N und P), die Ermittlung der Modelleingangswerte statt. Hierfür ist die Konzentration nach der Durchmischung beider Volumenströme ausschlaggebend. Der kommunale Schmutzwasserstrom beinhaltet 2.878 mg CSB l<sup>-1</sup>, 43,5 mg N l<sup>-1</sup> und 21,9 mg P l<sup>-1</sup>. Durch die VK reduzieren sich die Konzentrationen auf 1.727 mg CSB l<sup>-1</sup>, 39,2 mg N l<sup>-1</sup> und 19,79 mg P l<sup>-1</sup>. Die Charakteristika des Schmutzwasserstroms vom industriellen Indirekteinleiter, welcher hinter der VK zufließt, beinhaltet nach Angaben des Aufgabenträgers im Ablauf 600 mg CSB l<sup>-1</sup>, 234 mg N l<sup>-1</sup> und 30 mg P l<sup>-1</sup>. Die Zulaufmengen sowie der entstehende *Schlammanfall* sind nicht gegeben und werden für die Betrachtung anhand von Annahmen grob abgeleitet. Nach der Durchmischung beider Volumenströme resultieren Konzentrationen von 1.421 mg CSB l<sup>-1</sup>, 92 mg N l<sup>-1</sup> und 22,5 mg P l<sup>-1</sup>. Um diese Konzentration in der Berechnung des Moduls an der Stelle der Durchmischung (hinter der VK) zu erhalten, wird für die korrigierten Zulaufwerte der Rückhalt durch die VK mit aufsummiert. Die resultierenden korrigierten Zulaufwerte betragen für den CSB 2.368 mg l<sup>-1</sup>, für N 101 mg l<sup>-1</sup> und für P 25,0 mg l<sup>-1</sup>.

## 6. Parameteranpassung und Modellvalidierung anhand eines beispielhaften Aufgabenträgers in M-V

Durch die Anpassung der Eingangswerte im Modell verändert sich kalkulatorisch auch die Menge der Stofffrachten im Primärschlamm der VK. Die zusätzlichen Frachten sowie der daraus resultierende *Schlammanfall* liegen jedoch nicht real vor, weshalb diese in der KA-Stoffbilanzierung des Modells verrechnet werden. Zur Visualisierung der CSB-, N- und P-Stoffströme für die gesamte KA sind diese in einem Sankey-Diagramm dargestellt (siehe Abbildung 6-1).



**Abbildung 6-1:** Schematische Stoffstrombilanz für KA 12 des exemplarischen Aufgabenträgers

Die Tagesfracht des CSB vom kommunalen Schmutzwasserstrom beträgt  $8.760 \text{ kg d}^{-1}$ . Bei einem Rückhalt von 40 % des CSB in der VK ergibt sich eine Fracht im Ablauf von  $5.256 \text{ kg d}^{-1}$ , zurückgehalten werden  $3.504 \text{ kg d}^{-1}$ . Der einleitende industrielle Schmutzwasserstrom hat im Zulauf zum UASB-Reaktor (engl. Upflow Anaerobic Sludge Blanket) eine CSB-Fracht von  $7.500 \text{ kg d}^{-1}$  und im Ablauf von  $680 \text{ kg d}^{-1}$ . Unter Annahme der vordefinierten Reinigungsleistungen der einzelnen Komponenten der Vorbehandlung und enthaltenen Angaben des Aufgabenträgers zu den Stofffraktionen (siehe Anhang 8) resultiert eine CSB-, N-, P- und TS<sub>anorg</sub>-Tagesfracht im Zulauf zur Industrieschmutzwasservorbehandlung (bestehend aus Siebtrommelanlage, Absetzbecken und UASB-Reaktoren) von  $17.857 \text{ kg CSB d}^{-1}$ ,  $390 \text{ kg N d}^{-1}$ ,  $48 \text{ kg P d}^{-1}$  und  $4.667 \text{ kg TS}_{\text{anorg}} \text{ d}^{-1}$ . Im Sankey-Diagramm (siehe Abbildung 6-1) ist die Vorbehandlungsstufe des Industrieschmutzwassers vereinfacht als eine Anlagenkomponente dargestellt. In der Vorbehandlung werden  $10.350 \text{ kg CSB d}^{-1}$  und  $3.617 \text{ kg TS}_{\text{anorg}} \text{ d}^{-1}$  durch die Trommelsiebanlage und Absetzbecken zurückgehalten. Eine weitere Reduktion des CSB erfolgt in den UASB-Reaktoren durch die Hydrolyse des organisch partikulären CSB-Anteils von ca. 80 % ( $\triangleq 3.750 \text{ kg X}_{\text{CSB}} \text{ d}^{-1}$ ) und der Akkumulation der restlichen organischen und mineralischen partikulären Stoffe von  $2.893 \text{ kg TS d}^{-1}$ . Darin enthalten ist ein mineralischer Anteil von

933 kg TS<sub>anorg</sub> d<sup>-1</sup>. Da die Vorbehandlung des industriellen Schmutzwasserstromes im Modell nicht abgebildet wird, wird der in der industriellen Vorbehandlung zurückgehaltene TS-Frachtanteil in der Schlamm Bilanzierung der KA verrechnet. Durch die Änderung der Eingangsparameter fallen im Primärschlamm der VK 453 kg CSB d<sup>-1</sup> (davon sind 82 kg TS<sub>anorg</sub> d<sup>-1</sup>) sowie 28 kg N d<sup>-1</sup> und 4 kg P d<sup>-1</sup> zusätzlich an. Diese Überschüsse werden mit den in der Vorbehandlung des industriellen Indirekt-einleiters zurückgehaltenen Stofffrachten verrechnet. Zum Verständnis der dieser Betrachtung zugrunde liegenden Annahmen, sind im Anhang 8 sowohl die Herleitung der Zulauffrachten zur Vorbehandlung des Industrieschmutzwassers als auch - zur Abschätzung der akkumulierten partikulären Fracht - die Herleitung der Parameter für den UASB-Reaktor dargestellt.

### 6.3 Anpassung und Validierung der prozessbasierten Parameter

Aufgrund größerer Abweichungen der Simulationsergebnisse zu den vom Aufgabenträger angegebenen Werten, fanden bei den Prozessgrößen *Schlamm-mengen*, *elektrische Energieverbräuche*, *elektrische Energiegewinnung* und *Kanalzustände* parametrisierte Anpassungen statt. Erläuterungen zu den getätigten Anpassungen erfolgen in den jeweiligen Abschnitten. Nachfolgend werden die Validierungsergebnisse der prozessbasierten Parameter, welche zur Kostenermittlung der *Betriebsstoffe* und *bezogenen Leistungen* der KA und des SWEN herangezogen wurden, aufgezeigt.

#### 6.3.1 Fällmittel

Nach Angaben des betrachteten Aufgabenträgers wurden zur Erfüllung der in den Einleitungs-bescheiden festgelegten P-Konzentrationen im Jahr 2014 für das gesamte Entsorgungsgebiet 264.300 kg an *Fällmitteln* verbraucht. Das eingesetzte Fällmittel enthielt 123 g Fe je kg Fällmittel, was einer Gesamtmenge von 32.509 kg Fe entspricht. Den größten *Fällungsmittelverbrauch* hat hinsichtlich ihrer Ausbaugröße von 200.000 EW die KA 12 mit 13.277 kg. An diesem Standort findet neben der P-Fällung eine vorgeschaltete Bio-P-Elimination statt. Die Eliminationsleistung der Bio-P wurde vom Aufgabenträger mit 52 % angegeben.

Basierend auf den Herstellerangaben für die Fällmittellösung in Tabelle 6-2 wurden die Fe-Verbrauchsmengen ermittelt und den im Modell berechneten *Fe-Fällmittelmengen* gegenübergestellt.

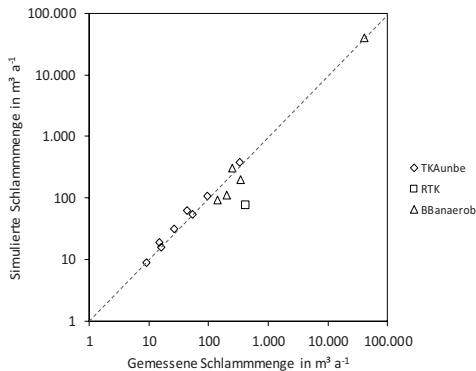
**Tabelle 6-2:** Vergleich von simulierten zu verbrauchten Fällmittelmengen

Bezeichnung	Wert	Einheit
Fällmittellösung	264.300	(t)
Anteil Wirksubstanz i.d. Lösung	41	(%)
Eisengehalt	123	(g Fe kg <sup>-1</sup> Fällmittel)
Realer Eisenbedarf 2014	13.329	(kg Fe a <sup>-1</sup> )
Simulierter Eisenbedarf 2014	14.077	(kg Fe a <sup>-1</sup> )
$\Delta_{\text{Sim,Real}}$	5,6	(%)

Die im Modell berechnete Eisenmenge für die P-Elimination in 2014 beträgt für den Aufgabenträger 14.077 kg Fe. Dies entspricht einer Abweichung von 5,6 % (748 kg Fe).

### 6.3.2 Schlammengen

In Abbildung 6-2 sind die Abweichungen zwischen simulierten und realen *Schlammengen* aller KA dargestellt. In Ergänzung dazu sind in Tabelle 6-3 die absoluten ermittelten und angegebenen Schlammvolumina sowie deren relative Abweichung aufgeführt. Bei der *Schlammmenge* von KA 12 handelt es sich ausschließlich um den Anteil, welcher in der KA anfällt ohne die zusätzlichen Schlammengen der Vorbehandlungsstufe des industriellen Schmutzwasserstromes.



**Abbildung 6-2:** Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Schlammvolumina von 2014

**Tabelle 6-3:** Absolute simulierte und gemessene Schlammvolumina von 2014 sowie deren relative Abweichungen

Objekt	$V_{S,Real}$ ( $m^3 a^{-1}$ )	$V_{S,Sim}$ ( $m^3 a^{-1}$ )	$\Delta V_S$ (%)
KA 1	53	55	3,8
KA 2	9	9	0,0
KA 3	325	380	16,9
KA 4	26	32	23,1
KA 5	344	203	-40,9
KA 6	426	76	-82,2
KA 7	201	113	-43,8
KA 8	44	64	45,5
KA 9	244	314	28,7
KA 10	94	109	15,9
KA 11	15	19	26,7
KA 12	40.834	40.661	0,0
KA 13	140	93	-33,6
KA 14	16	16	0,0

Im Hinblick auf die unterschiedlichen Verfahrenstechniken und GK der KA im Verbandsgebiet (siehe Anhang 9), ergab die Simulation der *Schlammengen* - mit den in Anhang 10 aufgeführten technischen Parametern - bezogen auf alle KA nur eine Abweichung von -1.1 % (-469  $m^3$ ) im Vergleich zu den gemessenen Werten. Bei der größten Anlage (KA 12), welche auch eine anaerobe Stabilisierung besitzt, betrug die Abweichung lediglich -0.4 %. Bei den kleineren KA, insbesondere bei den TKA kommt es jedoch zu größeren Abweichungen. Diese liegen beim EW-gewichteten Mittel für dieses Verfahren bei 13,1 % ( $\bar{x}=21,2 m^3 a^{-1}$ ,  $\sigma = 10,9 m^3 a^{-1}$ ) und variieren innerhalb einer Range zwischen 0  $m^3 a^{-1}$  bis 29,9  $m^3 a^{-1}$ . Die Abweichungen bei den TKA sind den unterschiedlichen TS-Gehalten (siehe Anhang 10) der einzelnen Anlagen geschuldet, die von 1,4 % bis 14,3 % variierten. Diese Spannweite kann aufgrund des, für diesen KA-Typ vordefinierten, TS-Gehalts vom Modell nicht abgebildet werden. Bei den KA mit GK<3, welche auf dem Belebungsverfahren beruhen, lag das EW-gewichtete Mittel bei -27,4 % ( $\bar{x}=103,6 m^3 a^{-1}$ ,  $\sigma = 100,3 m^3 a^{-1}$ ). Die Abweichungen variierten innerhalb einer Range von -242,0  $m^3 a^{-1}$  bis 7,3  $m^3 a^{-1}$ . Bei diesem Verfahren gab es ausschließlich bei den Primärschlämmen größere Differenzen, diese lagen bei 2,5 % bis 8,7 %. Die TS-Gehalte der Überschussschlämme lagen mit 1,9 % bis 2,9 % im erwarteten Bereich und entsprachen den voreingestellten Standardwerten.

### 6.3.3 Elektrische Energieerzeugung

Im Gebiet des Aufgabenträgers wird Energiegewinnung mittels Faulung am Standort der KA 12 realisiert. Basierend auf den Angaben des Aufgabenträgers bzgl. der *erzeugten Energiemengen*, wurden die Standardwerte der stofflichen Parameter ( $f_{\text{Gas}}$ ,  $f_{\text{CH}_4}$ ) abgeleitet und angepasst. In Tabelle 6-4 sind die für die Berechnung festgelegten Parameterwerte sowie die daraus resultierenden Gas- und *elektrischen Energiemengen* abgebildet.

**Tabelle 6-4:** Prozessbezogene Parameter zur Bestimmung der täglichen Energieerzeugung von KA 12 für 2014

	$B_{\text{LoTS}}$ (kg d <sup>-1</sup> )	$f_{\text{Gas}}$ (l kg oTS <sup>-1</sup> )	$Q_{\text{Gas}}$ (N m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	$f_{\text{CH}_4}$ (l CH <sub>4</sub> l Gas)	$Q_{\text{CH}_4}$ (N m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	$E_{\text{el,Gas}}^{1)}$ (kWh d <sup>-1</sup> )
Industrie Abwasser (UASB)	5.547	570	3.162	0,569	1.800	5.778
Kommunales Abwasser	4.382	530	2.462		1.290	4.142
Co-Substrat <sup>2)</sup>	3.615	350	1.265	0,524	663	2.128
					$\Sigma$	12.048

<sup>1)</sup> Wirkungsgrad der Generatoren  $\eta = 0,321$

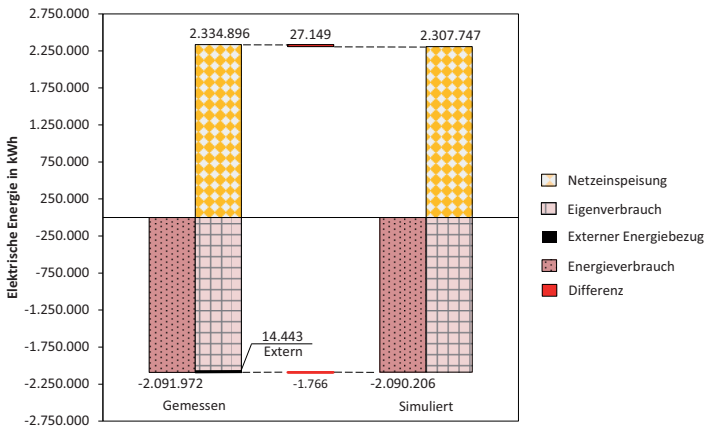
<sup>2)</sup> Annahmewerte

Da die elektrischen Energiekosten einen Großteil der Betriebskosten (38 % in 2001) darstellen, ist eine möglichst genaue Abbildung des realen Energieverbrauchs und der *Energieerzeugung* für die Modellgüte von hoher Relevanz. Durch die Anpassung der Parameter konnte eine möglichst geringe Abweichung zwischen Simulations- und Realwerten erzielt werden. Diese Abweichungen betragen für die *erzeugte Energiemenge* aus dem industriellen Schmutzwasserstrom 1 kWh d<sup>-1</sup> und beim kommunalen Abwasserstrom zusammen mit den Co-Substraten 0 kWh d<sup>-1</sup>. Die Fracht an Co-Substraten wurde basierend der Energiebilanz geschätzt und ergänzt.

In Abbildung 6-3 sind die simulierte *elektrische Energieerzeugung* und der elektrische Energieverbrauch den angegebenen Werten des betrachteten Aufgabenträgers gegenübergestellt. Der Annahme im Modell entsprechend findet auch real zuerst der Verbrauch der *erzeugten elektrischen Energie* statt, restliche Überschüsse werden ins Netz eingespeist.



## 6. Parameteranpassung und Modellvalidierung anhand eines beispielhaften Aufgabenträgers in M-V



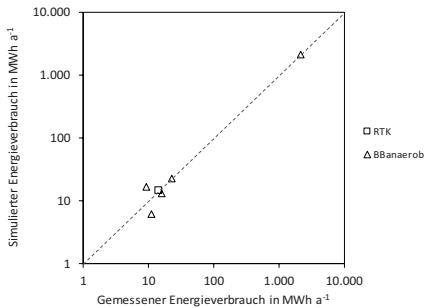
**Abbildung 6-3:** Energiebilanzierung zwischen gemessenen und simulierten Werten des elektrischen Energieverbrauchs und Energieerzeugung von KA 12 in 2014

Basierend auf den Daten von 2014 betrug der Energieverbrauch von KA 12  $2.091 \text{ MWh a}^{-1}$  und die erzeugte Energiemenge  $4.397 \text{ MWh a}^{-1}$ . Laut Angaben des Aufgabenträgers wurden davon  $2.334 \text{ MWh a}^{-1}$  ins Stromversorgungsnetz eingespeist. Zwischen Verbrauch, Erzeugung und Netzeinspeisung ergibt sich in der Bilanzierung ein Fehlbetrag von  $14 \text{ MWh a}^{-1}$ . Für die Betrachtung wird angenommen, dass diese Energiemenge extern bezogen wurde. Der restliche Energiebedarf wird durch die Eigenstromerzeugung gedeckt. Die simulierte erzeugte Gesamtenergiemenge (kommunal und industrieller Abwasserstrom) im Modell beträgt  $4.398 \text{ MWh a}^{-1}$ . Von dieser Energiemenge werden  $2.090 \text{ MWh a}^{-1}$  für die Eigenstromversorgung genutzt, wodurch  $2.308 \text{ MWh a}^{-1}$  in das Stromversorgungsnetz eingespeist werden. Im Vergleich zur realen elektrischen Energieeinspeisung, weist das Modell damit einen Fehlbetrag von  $-1,2 \%$  ( $-27 \text{ MWh a}^{-1}$ ) auf. Dieser resultiert aus der höheren realen Netzeinspeisung mit einer Differenz von  $13 \text{ MWh a}^{-1}$  und dem Energiebilanzfehlbetrag von  $14 \text{ MWh a}^{-1}$ .

### 6.3.4 Elektrische Energieverbräuche

Eine Gegenüberstellung der angegebenen mit den anhand von einwohnerspezifischen Energieverbrauchswerten der DWA (2012a) ermittelten *elektrischen Energieverbräuchen* von sechs KA, welche in Abhängigkeit von der Verfahrenstechnik und GK aufgeführt sind, ergab eine Abweichung von ca.  $200 \%$  (siehe Anhang 11). Aufgrund der hohen Abweichung erfolgte eine Anpassung für die *elektrischen Energieverbräuche* im Modell, indem die angegebenen Energieverbräuche des Aufgabenträgers nach Verfahrenstechnik und GK kategorisiert wurden. In der Kategorie Belebungsverfahren mit GK1-3 lagen Werte von drei KA vor, hier wurde der für diese Kategorie repräsentativste (geringste Abweichung in der Summe) elektrische Energieverbrauchswert durch eine Iteration ermittelt (siehe Kap. 4.4.2). Basierend auf diesem Vorgehen sind in Abbildung 6-4, die vom Modell berechneten den angegebenen *elektrischen Energieverbräuchen* gegenübergestellt.

## 6. Parameteranpassung und Modellvalidierung anhand eines beispielhaften Aufgabenträgers in M-V



**Abbildung 6-4:** Gegenüberstellung der gemessenen und simulierten elektrischen KA Energieverbräuche von 2014

**Tabelle 6-5:** Absolute gemessene und simulierte elektrische Energieverbräuche der KA sowie deren relativen Abweichungen von 2014

Objekt	$E_{el,Real}$ (MWh a <sup>-1</sup> )	$E_{el,Sim}$ (MWh a <sup>-1</sup> )	$\Delta E_{el}$ (%)
KLA 5	9,1	16,7	-88,8
KLA 6	14,2	14,2	0,0
KLA 7	15,9	13,3	16,4
KLA 9	22,7	22,7	0,0
KLA 12	2.091	2.090	0,1
KLA 13	11,1	6,2	44,1

In der Summe der KA überschätzen die berechneten, die gemessenen *elektrischen Energieverbräuche* mit einer absoluten Abweichung von 1,76 MWh a<sup>-1</sup>, dies entspricht einer relativen Abweichung von 0,1 %. Hinsichtlich des Anteils am *Gesamtennergieverbrauch* beeinflusst KA 12 das gewichtete Mittel immens. Denn bei diesem Standort beträgt die relative Abweichung 0,1 % (1 MWh a<sup>-1</sup>). Bei Außerachtlassung von KA 12 ergibt sich ein nach Anlagengröße (EW) gewichtetes Mittel von 0,01 %, der absolute Betrag in der Summe der Abweichung beträgt -4,4 kWh a<sup>-1</sup>. Die Abweichungen der Einzelverbrauchswerte befinden sich in einer Range von -88,8 % bis 44,1 % (-7,6 MWh a<sup>-1</sup> bis 4,9 MWh a<sup>-1</sup>).

### 6.3.5 Kanalzustandsklassen

Weil keine Daten über die *Kanalzustände* im Entsorgungsgebiet zum Zeitpunkt der Erhebung vorlagen, wurden in Rücksprache mit dem Aufgabenträger die mittleren *Kanalzustandsklassen* für Deutschland von Berger et al. (2001) für 2001 und für 2014 die landesweite Untersuchung zum Zustand der Kanalisation in M-V aus dem Jahr 2009 (MLUV M-V 2009) auf das SWEN des Aufgabenträgers übertragen (siehe Tabelle 6-6). Nach Angaben des Aufgabenträgers entsprechen diese prozentualen Zustandsklasseneinteilungen den Erfahrungswerten und Einschätzungen, so dass diese als repräsentativ für dessen Entsorgungsgebiet angesehen werden können.

**Tabelle 6-6:** Durchschnittliche Anteile der Kanalzustandsklassen für 2001 (Berger et al. 2001) und 2014 (MLUV M-V 2009) und die daraus hergeleiteten Kanallängen bezogen auf das SWEN des Aufgabenträgers

ZK	2001		2014	
	Anteil Kanalsystem (%)	Kanallänge (km)	Anteil Kanalsystem (%)	Kanallänge (km)
4	69	110	67	188
3	14	22	18	49
2	10	16	10	27
1	4	6	4	11
0	3	5	1	4

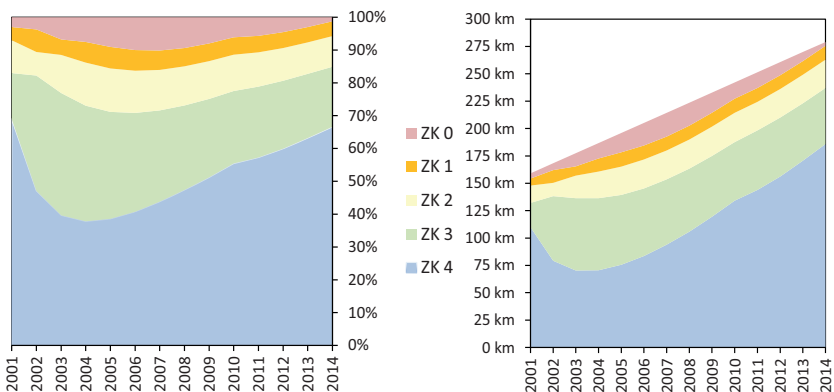
## 6. Parameteranpassung und Modellvalidierung anhand eines beispielhaften Aufgabenträgers in M-V

Anhand der in Tabelle 6-6 vorliegenden Verteilung der *Kanalzustandsklassen* der beiden Jahre, wurde das Alterungsmodell angepasst. Um den Kanalnetzanteil der ZK0 von 43,3 % auf 1,3 % innerhalb des Betrachtungszeitraumes zu reduzieren, bedarf es einer mittleren jährlichen Sanierungsquote von 2,7 %. Innerhalb dieses Zeitraumes verlängerte sich das SWEN des Aufgabenträgers um 120 km (von 159 km in 2001 auf 279 km in 2014), dies entspricht einer Kanalneubauquote von jährlich 5,8 %. Zur Abbildung des Alterungsprozesses und der damit verbundenen Veränderungen der Kanalnetzanteile der einzelnen *Zustandsklassen*, wurden in Anlehnung an die Werte von Jansen (2012) die Alterungsvektoren der Überlebensfunktionen schrittweise angepasst, bis die simulierten denen der mittleren *Kanalzustände* von M-V entsprachen. Die Neuerschließungen innerhalb dieser Jahre wurden dabei berücksichtigt. In Tabelle 6-7 sind die Alterungsvektoren für die fünf *Zustandsklassen* des Kanalalterungsmodells zu entnehmen.

**Tabelle 6-7:** Parametereinstellungen für das Kanalalterungsmodell basierend auf den Durchschnittswerten in M-V

Parameter	ZK 4	ZK 3	ZK 2	ZK 1
a	20	45	75	65
b	0,12	0,07	0,05	0,03
c	0	0	0	0

Basierend auf den Parametereinstellungen, den Kanalneubauten sowie den angenommenen *Kanalzuständen* ergibt sich, die in Abbildung 6-5 dargestellte Verteilung und Entwicklung der Kanalnetzanteile in den jeweiligen *Zustandsklassen* (detaillierte Angaben in Anhang 12).



**Abbildung 6-5:** Simulierte Kanalzustände des exemplarischen Aufgabenträgers, links in relativen und rechts in absoluten Werten

Aufgrund der Zentralisierung zur Erhöhung des Anschlussgrades an die kommunale Abwasserentsorgung, wurden zwischen den Jahren 1991 und 2000 ca. 120 km sowie zwischen 2001 und 2010 ca. 52 km Schmutzwasserleitungen erneuert und neugebaut. Das mittlere Kanalalter im Jahr 2001 betrug 8 Jahre. Durch den verringerten Neubau und Sanierung in den darauffolgenden Jahren stieg das mittlere

Kanalalter auf 17 Jahre. Basierend auf den Daten des statistischen Landesamtes und den Angaben des Aufgabenträgers wurden zwischen 2010 und 2014 ca. 66 km Abwasserleitung neugebaut. Dadurch verringerte sich das mittlere Kanalalter um 1 Jahr. Die aus den simulierten *Kanalzustandsklassen* resultierenden Kosten für die Kanalinstandhaltung sind in Kap. 6.4.1 aufgeführt.

#### 6.4 Validierung ökonomischer Parameter

Unter ökonomischen Parametern werden angegebene oder sich aus den prozessbasierten Parametern hergeleitete Kosten verstanden, welche für die Kostenbilanzierung und zur Abbildung der Kostenstruktur herangezogen werden. Alle Kostenarten sowie die Aktiva und Passiva wurden den Jahresabschlüssen entnommen. Kosten der *Betriebsstoffe* und *bezogenen Leistungen*, welche sich aus den prozessbasierten Parametern der Module *KA* und *SWEN* herleiten lassen, wurden beim Aufgabenträger abgefragt.

Die Festlegung der Rahmenparameter für den Validierungszeitraum erfolgte anhand der Analyse langjähriger Zeitreihen (Kap. 4.2). Hinsichtlich der divergenten Trends bei der Preisentwicklung einzelner Dienstleistungen und *Betriebsstoffe* in Bezug zu den Verbraucherpreisen (StatBA 2017b), wurde - um die realen Rahmenbedingungen abbilden zu können - die historische Entwicklung dieser Preise für die Validierung mitberücksichtigt. Dies betrifft die Strompreisentwicklung (BDEW 2015), die Einspeisevergütung (BMWi 2016), Preise für die Schlammentsorgung und Preise für die Kanalreinigung (Daten des Aufgabenträgers). Für Rehabilitationsmaßnahmen an den Kanalnetzen und dem Bau sowie der Sanierung von KA wurde für die Validierung der Baupreisindex für Ingenieurbauwerke bzw. Ortskanäle (StatBA 2017c) angesetzt.

Basierend auf diesen Daten und deren Auswertung (siehe Kap. 4.3.2) wurden die folgenden Rahmenbedingungen in Form von jährlichen Veränderungsraten für den Validierungszeitraum abgeleitet:

<u>Gebietsspezifische Veränderungsraten:</u>		<u>Ökonomische Veränderungsraten:</u>	
• Gewerbe und Industrie:	±0.0 %	• Verbraucherpreise:	1.7 %
• Bevölkerung:	-1.4 %	• Baupreise:	1.6 %
• Neuerschließungsrate:	0.7 %	• Strompreise:	10.5 %
• Kanalrehabilitation:	0.7 %	• Einspeisevergütung:	-1.2 %
• Kanalreinigung:	5.0 %	• Personalkosten:	2.3 %
		• Kanalreinigungskosten:	2.5 %
		• Kanalrehabilitationskosten:	0.7 %
		• Schlammmentsorgungskosten:	5.0 %

Im Folgenden wird zunächst die Validierung der Kosten, welche sich aus den prozessbasierten Parametern aus dem Modul *SWEN* sowie dem Modul *KA* herleiten lassen, erläutert. Anschließend erfolgt die Validierung der Kostenarten, Gesamtkosten und Mengengebühr.

#### 6.4.1 Kanalstandhaltungskosten

Basierend auf der Anpassung der Alterungsvektoren der Herz-Überlebensfunktionen an die mittlere Verteilung der *Kanalzustandsklassen* in M-V und der Übertragung auf das Kanalnetz des Aufgabenträgers resultieren, ausgehend von den Werten des Jahres 2001 und der festgelegten Sanierungs- und Neuerschließungsquote die in Tabelle 6-8 aufgezeigten Abweichungen zwischen den simulierten und angegebenen Kanalstandhaltungskosten für das Jahr 2014 (die Kostenentwicklung für die Instandhaltung des SWEN über den Validierungszeitraum befindet sich in Anhang 13).

**Tabelle 6-8:** Simulierte Kosten für die Kanalstandhaltung am Ende des Validierungszeitraumes 2014

Position	$\Delta_{\text{Sim,Real}}$	
	(T€ a <sup>-1</sup> )	(%)
Kanalreparatur	0,6	4,6
Invest <sub>Kanal</sub>	-275	-11,5
RBW <sub>Kanal</sub>	222	0,7

Bei den simulierten Kanalreparaturkosten resultiert eine Abweichung von 4,6 % (0,6 T€) im Verhältnis zu den realen entstandenen Kosten. Die Investitionskosten für das Kanalnetz setzen sich aus den Kosten für die Kanalsanierung/-erneuerung sowie den Neuerschließungen zusammen. Diese Kosten ergeben sich aus der Festlegung der Kanalsanierungsquote und der Neuerschließungsquote (siehe Kap. 4.4.1). Die Abweichungen der simulierten im Vergleich zu den realen Sanierungskosten beträgt, -11,5 % (-275 T€ a<sup>-1</sup>). Aus der Summe dieser Investitionskosten abzüglich der *Abschreibungen* für das Kanalnetz ergibt sich der Restbuchwert des Sachanlagevermögens vom Kanalnetz. Der simulierte Restbuchwert des Kanalnetzes hat eine Abweichung von 0,7 % (222 T€ a<sup>-1</sup>).

#### 6.4.2 Reinvestitionskosten der Kläranlagen

Basierend auf den Restbuchwerten der Bilanzen, wird für den Validierungszeitraum angenommen, dass keine Neubauten oder größere Reinvestitionen an den KA stattfanden. Dies begründet sich aus der Verringerung des Sachanlagenwertes der KA (Restbuchwert) durch die stetigen *Abschreibungen* über den Zeitraum. Zur Bestimmung der Modellgenauigkeit sind vergleichend in Tabelle 6-9, ausgehend von den Werten für das Jahr 2001 und der Fortführung der *Abschreibungen*, die Abweichung zwischen den angegebenen und den simulierten Sachanlagenwerten für das Jahre 2014 angegeben.

**Tabelle 6-9:** Abweichungen zwischen den angegebenen und simulierten KA Restbuchwerten von 2001 und 2014

Position	$\Delta_{\text{Sim,Real}}$	
	(T€)	(%)
RBW <sub>KA,2014</sub>	-141	-3,1

Am Ende des Betrachtungszeitraumes im Jahr 2014 beträgt die Abweichung des simulierten Restbuchwertes -3,1 % (-141 T€). Die Abweichung kann zum einen durch die mittlere Nutzungsdauer aller KA (bei verschiedenen Verfahrenstechniken mit unterschiedlichen Nutzungsdauern) verursacht sein. Durch eine geringere mittlere Nutzungsdauer kommt es zu höheren jährlichen *Abschreibungen*. Zum anderen könnten auch Erweiterungen oder Investitionen an den Anlagen stattgefunden haben, welche

aufgrund der Annahme, dass keine Reinvestitionen stattfanden, nicht berücksichtigt wurden. Dann wären die realen Restbuchwerte und *Abschreibungen* gestiegen, was ebenfalls zu einer negativen Differenz zwischen realen und simulierten Restbuchwerten führt.

#### 6.4.3 Prozessbasierte Betriebsstoffe, Erträge und bezogene Leistungen

Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen ergeben sich für den Validierungszeitraum anhand der prozessbasierten Parameter die in Tabelle 6-10 dargestellten absoluten und relativen Abweichungen zu den dargestellten *Betriebsstoffen* und *bezogenen Leistungen*. Eine Übersicht simulierter Werte des Validierungszeitraums von prozessbasierten Parametern und den hergeleiteten Kosten sind in Anhang 14 aufgeführt.

**Tabelle 6-10:** Absolute und prozentuale Abweichung der simulierten zu den realen Kosten am Ende des Validierungszeitraumes 2014

Kosten/Erträge	Kostenart	$\Delta_{\text{Sim,Real}}$	
		(T€ a <sup>-1</sup> )	(%)
Netzeinspeisung	Erträge	-0,9	-0,4
Elektrische Energie	Betriebskosten	-2	-11,3
Fällmittel		1	3,0
Schlammentsorgung	Bezogene Leistungen	-10	-6,2
Kanalreinigung		0,6	6,7

Der simulierte Ertrag aus der Netzeinspeisung von elektrischer Energie neigt am Ende des Betrachtungszeitraumes mit -0,4 % (-870 €) zu einer geringfügigen Abweichung der angegebenen Werte. Diese Unterschätzung passt in der Tendenz zur simulierten elektrischen Energiemenge (Abbildung 6-3). Hinsichtlich der relativen Abweichung von -11,3 % bei den elektrischen Energiekosten, scheint eine hohe Ungenauigkeit bei der Kostensimulation vorzuliegen. Jedoch beträgt die absolute Abweichung lediglich -1.810 €. Im Verhältnis zu den Gesamtkosten ist dieser Betrag (mit 0,03 % der Gesamtkosten) als marginal anzusehen. Es ist anzunehmen, dass die tatsächlichen Strompreise geringer waren als die im Modell angesetzten, da hinsichtlich der simulierten *elektrischen Energieverbräuche* eine geringfügige Überschätzung der Kosten zu erwarten ist. Die simulierten Kosten für Fällmittel und Schlammentsorgung folgen den Tendenzen der Über- bzw. Unterschätzung ihrer prozessbasierten Parameter mit 3,0 % (1.118 €) und -6,2 % (-10.400 €). Zur Herleitung der Kanalreinigungskosten wird der Aufwand proportional in Abhängigkeit zur prozessbasierten Größe der Abwassermenge gesetzt (siehe Kap. 4.4.3). Der Vergleich zwischen den simulierten und angegebenen Kanalreinigungskosten weist eine Abweichung von -9,0 % (-1.081 €) auf.

#### 6.4.4 Gesamtkosten und Mengengebühr

Aus der Summe aller Kostenarten ergeben sich die jährlichen Gesamtkosten des Aufgabenträgers. Diese sind zugleich die gebührenwirksamen Kosten und werden der angefallenen Schmutzwassermenge gegenübergestellt und darauf basierend die Mengengebühren berechnet. In Tabelle 6-11 sind die Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den angegebenen Aufwänden sämtlicher Kostenarten erfasst.

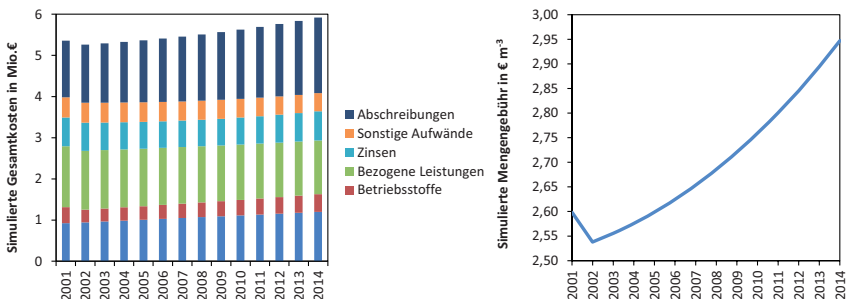
## 6. Parameteranpassung und Modellvalidierung anhand eines beispielhaften Aufgabenträgers in M-V

**Tabelle 6-11:** Absolute und prozentuale Abweichung der simulierten zu den realen Kostenarten

Kostenart	$\Delta_{\text{Sim,Real}}$	
	(T€ a <sup>-1</sup> )	(%)
Personalkosten	-0,40	0,0
Betriebsstoffe	-10	-2,2
Bezogene Leistungen	21	1,6
Zinsen	35	5,1
Sonstige Aufwände	0,3	0,0
Abschreibungen	-22	-1,2
Gesamtkosten	24	0,4

Die *Personalkosten* und *sonstigen Aufwände* werden mit einer Abweichung von 0,0 % bei beiden Kostenarten, mit einer absoluten Abweichung von -0,4 T€ a<sup>-1</sup> bei den *Personalkosten* und 0,3 T€ a<sup>-1</sup> bei den *sonstigen Aufwänden*, beinahe exakt simuliert. Bei den *Betriebsstoffen* und *Abschreibungen* liegen Unterschätzungen von 2,2 % (-10 T€ a<sup>-1</sup>) und 1,2 % (-22 T€ a<sup>-1</sup>) der angegebenen Kosten vor. Zu Überschätzungen von 1,6 % (21 T€ a<sup>-1</sup>) und 5,1 % (35 T€ a<sup>-1</sup>) kommt es bei den *bezogenen Leistungen* und *Zinsaufwänden*. Die Abweichungen bei den einzelnen Kostenarten sind durch den Rechenalgorithmus des Modells bedingt. Zum einen werden die Rahmenbedingungen für den gesamten Betrachtungszeitraum definiert, obwohl die einzelnen Größen Schwankungen unterliegen. Dies betrifft hier insbesondere die Inflation und Zinsen. Im Bezug zum Modell entstehen dabei, in Abhängigkeit vom Investitionsjahr und den resultierenden Abweichungen zu den realen Inflationsraten und Kreditzinssätzen, Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der *Abschreibungs-* und *Zinskosten*.

In der Summe haben die Abweichungen aufgrund des annähernden Ausgleichs von Über- und Unterschätzungen keine große Relevanz. Die Abweichung zwischen den simulierten und angegebenen Gesamtkosten in 2014 beträgt 0,4 % (24 T€ a<sup>-1</sup>). Für den Validierungszeitraum sind die Gesamtkosten in ihrer jährlichen Kostenstruktur (Zahlenwerte in Anhang 15) sowie die daraus kalkulierten Mengengebühren in Abbildung 6-6 abgebildet.



**Abbildung 6-6:** Kostenstruktur (links) und Mengengebühr (rechts) in Jahresscheiben im Validierungszeitraum

Im Validierungszeitraum stiegen die Gesamtkosten real um 9,6 % (515 T€ a<sup>-1</sup>). In der Simulation beträgt dieser Anstieg 11,2 % (601 T€ a<sup>-1</sup>). Aus Abbildung 6-6 ist eine Verringerung der Gesamtkosten bzw. Mengengebühr im Jahr 2002 ersichtlich, diese resultiert aus der Inbetriebnahme der Faulgasverwertungsanlage von KA 12 im selbigen Jahr. Dadurch verringerten sich der *Schlammfall* und der *elektrische Energiebedarf* durch die Eigenversorgung. Zudem sanken die Betriebskosten und zusätzlich wurde ein Ertrag durch die *elektrische Energieeinspeisung* erwirtschaftet.

Die Mengengebühr stieg über den Betrachtungszeitraum um 0,35 € m<sup>-3</sup> auf 2,95 € m<sup>-3</sup>, während die reale Mengengebühr konstant bei 2,60 € m<sup>-3</sup> verblieb. Dieser Unterschied in der Gebühr liegt darin begründet, dass im vorliegenden Modell die *Auflösung von Fördermitteln und Beiträgen* aufgrund des Rechenalgorithmus nicht berücksichtigt werden kann. Tabelle 6-12 stellt dar, um welchen Betrag die simulierte Mengengebühr dadurch gemindert werden muss. Falls derartige Veränderungen während des Betrachtungszeitraumes nicht auftreten, erübrigt sich eine Ergebnisbereinigung.

**Tabelle 6-12:** Resultierende Abweichung der simulierten Mengengebühr nach Abzug der in der Simulation nicht berücksichtigten Auflösung von Beiträgen und Fördermittel

Bezeichnung	Mengengebühr
Simulierte Mengengebühr	2,95€ m <sup>-3</sup>
Auflösung von Fördermitteln und Beiträgen	-0,36 € m <sup>-3</sup>
Korrigierte Mengengebühr	2,59 € m <sup>-3</sup>

Der Betrag zur Minderung der Gebühr durch die *Auflösung der Fördermittel und Beiträge* wurde mit 0,36 € m<sup>-3</sup> ermittelt. Durch die Bereinigung der simulierten Mengengebühr um diesen Betrag resultiert eine korrigierte Mengengebühr von 2,59 € m<sup>-3</sup>. Damit liegt eine Unterschätzung von 0,01 € m<sup>-3</sup> vor im Vergleich zur realen Mengengebühr im Jahr 2014.

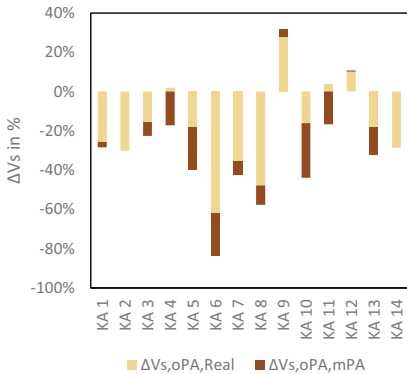
## 6.5 Einfluss der Parameteranpassung auf die Modellgüte

Für die Validierung der technischen Prozesse des betrachteten Aufgabenträgers wurden die prozessbezogenen Parameter der Module *KA* und *SWEN* kalibriert. Folgend findet eine Analyse des Effektes einer Parameteranpassung auf die Modellgüte statt. Hierfür wurden die Abweichungen der simulierten Parameter und Kostenarten am Ende des Validierungszeitraumes mit und ohne Kalibrierung (Standardeinstellungen) gegenübergestellt.

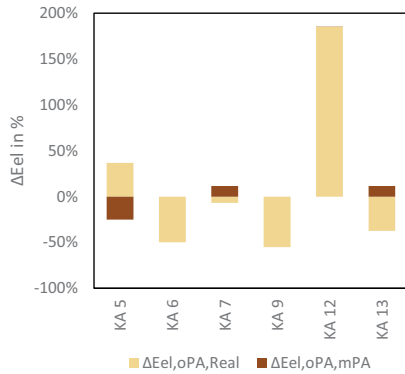
Außer der Zulaufkonzentrationsanpassung für die Berücksichtigung des Industrieeinleiters der KA 12, fanden bei den anderen KA keine weiteren Anpassungen der Anlagendaten statt. Da die Phosphorzulaufkonzentrationen bei der Parameteranpassung nicht verändert wurden, liegen auch keine Abweichungen bei den *Fällmittelmengen* vor. Zur Kalibrierung der *Schlammengen* erfolgte eine Angleichung über den TS-Gehalt. Die Abweichungen der simulierten *Schlammengen* ohne Parameteranpassung im Vergleich zu den Realwerten als auch zu den Werten mit Parameteranpassung sind in Abbildung 6-7 dargestellt. Für die Kalibrierung der *elektrischen Energieverbräuche* wurden, statt der einwohnerspezifischen Verbräuche der DWA (2012a), die angegebenen *elektrischen Energieverbräuche* des Aufgabenträgers verwendet. In Abbildung 6-8 sind die Abweichungen zwischen beiden Berechnungsansätzen im Vergleich zu den Realwerten illustriert.



## 6. Parameteranpassung und Modellvalidierung anhand eines beispielhaften Aufgabenträgers in M-V



**Abbildung 6-7:** Rel. Abw. zw. Ergebnissen ohne und mit Parameteranpassung und realen Schlammvolumina



**Abbildung 6-8:** Rel. Abw. zw. Ergebnissen ohne und mit Parameteranpassung und realen elektr. Energie-verbräuchen

Die Abweichung zwischen den realen zu den ohne Parameteranpassung simulierten *Schlamm*mengen beträgt im arithmetischen Mittel aller KA -22,4 %. Damit neigt die Simulation der *Schlamm*mengen ohne Parameteranpassung zur Unterschätzung der realen Menge. Dabei befinden sich die Abweichungen in einer Spanne von -83,6 % bis 31,9 %. Bei ausschließlicher Betrachtung der technischen Verfahren (BB, RTK, SBR) beträgt die mittlere Abweichung der simulierten *Schlamm*menge zu den Realwerten in der Summe -26,0 %. Die Spannweite der relativen Abweichung zwischen simulierter und realer *Schlamm*menge bei den naturnahen biologischen Verfahrenstechniken (TKA, PKA) liegt bei -47,8 % bis 3,9 % bei einem Mittelwert von -19,8 %.

Basierend auf den einwohnerspezifischen Werten der DWA (2012a) für den *elektrischen Energieverbrauch* von KA resultiert eine Abweichung zwischen den realen und simulierten Werten von -55,2 % bis 185,7 %, bei einem Mittelwert von 12,1 %. Ohne Berücksichtigung des Ausreißers KA 12 mit 182 % beträgt der Maximalwert der Abweichungen 36,8 % und der Mittelwert -22,5 %. In der Summe beträgt die Abweichung zwischen den realen und mit Parameteranpassung simulierten jährlichen *Energieverbräuchen* bei den kleineren KA (mit Außerachtlassung von KA 12) 4 kWh a<sup>-1</sup>. Ohne Parameteranpassung (mit DWA-Werten) beträgt diese Abweichung -21,522 MWh a<sup>-1</sup>. Unter Einbeziehung von KA 12 ist der Effekt der Parameteranpassung bezogen auf die Abweichungen noch stärker ausgeprägt. Die Abweichung zum realen jährlichen Gesamtenergieverbrauch für alle KA im Entsorgungsgebiet des Aufgabenträgers beträgt mit Parameteranpassung -1,762 MWh a<sup>-1</sup> und ohne 3,859 MWh a<sup>-1</sup>.

Durch die Parameteranpassung resultieren auch Unterschiede bei den abgeleiteten Kosten. In Tabelle 5-13 sind die abgeleiteten Kosten bzw. Erträge ohne Parameteranpassung sowie die damit verbundenen Abweichungen zu den realen Kosten aufgeführt.

## 6. Parameteranpassung und Modellvalidierung anhand eines beispielhaften Aufgabenträgers in M-V

**Tabelle 6-13:** Absolute und relative Abweichungen zwischen realen und den ohne Parameteranpassung simulierten prozessbasierten Kosten

Kosten	$\Delta\text{Sim}_{\text{OPARreal}}$	
	(T€)	(%)
Elektr. Energieverbrauch	29	155,6
Netzeinspeisung	-207	-96,0
Fällmittel	2	6,6
Schlammentsorgung	262	156,8
Kanalreparatur	-2	-12,8

Aufgrund des höheren *elektr. Energieverbrauchs* bei der Simulation ohne Parameteranpassung bei gleichzeitig geringerer *Energieerzeugung* (-10,4 % im Vergleich zum Realwert) resultiert eine 100 %-ige Nutzung der erzeugten Energie, wodurch die Erträge für die Netzeinspeisung von 206.862 € wegfallen. Es bleibt ein Energiedefizit von 1.411 MWh a<sup>-1</sup>, welcher durch externe Energie gedeckt werden muss und 155,6 % (29 T€) höhere Energiekosten bewirkt. Die Abweichung bei den Fällmitteln beträgt 11,9 % (2 T€). Um 156,3 % (262 T€) werden, ohne eine Parameteranpassung, die Schlammentsorgungskosten überschätzt. Ohne Anpassung der Alterungsvektoren der Herz-Überlebensfunktionen des Kanalalterungsmodells werden die Kanalreparaturkosten mit -12,8 % (-2 T€) unterschätzt im Vergleich zu den realen Kosten. Dementgegen werden mit Parameteranpassung die Kosten überschätzt, jedoch mit nur 4,6 %.

Unter Berücksichtigung aller Kosten ergeben sich die in Tabelle 6-14 dargestellten Abweichungen mit und ohne Parameteranpassung bei den einzelnen Kostenarten und der daraus ermittelten Mengengebühr.

**Tabelle 6-14:** Abweichung zwischen den ohne Parameteranpassung simulierten Kostenarten und den realen Kosten

Kostenart	$\Delta\text{Sim}_{\text{OPARreal}}$	
	(T€)	(%)
Personalkosten	-0,4	0,0
Betriebsstoffe	412	10,7
Bezogene Leistungen	591	39,9
Zinsen	-354	-51,1
Sonstige Aufwände	111	22,5
Abschreibungen	322	23,4
Gesamtkosten	707	12,0
Mengengebühr	0,80	30,9
Mengengebühr (bereinigt)	0,44	17,0

In der Tendenz liegen bei der Simulation ohne Parameteranpassung größere Abweichungen bei den Kostenarten vor. Die Gesamtkosten werden um 12,0 % (707 T€) überschätzt. Größere Abweichungen existieren bei den Kostenarten *bezogene Leistungen* mit 39,9 % (591 T€) und *Zinsen* mit -51,1 % (-354 T€). Bei den anderen Kostenarten werden die Kosten von 10,7 % bis 23,4 % überschätzt.

Die resultierenden Mengengebühren der jeweiligen Betrachtung sind in Abbildung 6-9 dargestellt.

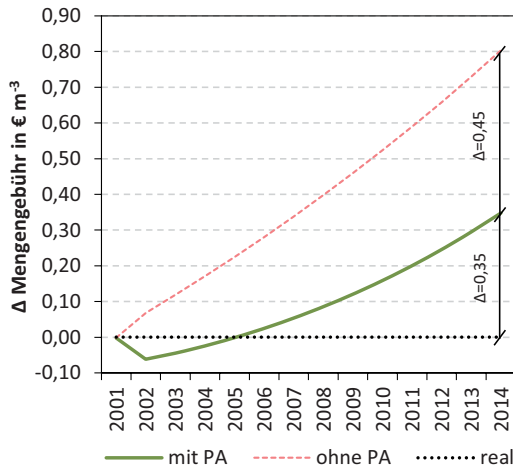


Abbildung 6-9: Vergleich der simulierten Mengengebühren mit und ohne Parameteranpassung

Die ermittelten Mengengebühren ohne Parameteranpassung bilden die Reduzierung der Betriebskosten durch die Inbetriebnahme der Faulgasverwertung in 2002 nicht ab, weshalb ein direkter Gebührenanstieg ab dem Jahr 2002 berechnet wird. Generell führt ohne eine Parameteranpassung die Summe der Abweichungen zu einer Überschätzung der Mengengebühr von  $0,80 \text{ € m}^{-3}$ . Abzüglich der Gebührenminderung durch die *Auflösung von Fördermitteln und Beiträgen* in Höhe von  $-0,36 \text{ € m}^{-3}$ , beträgt die Überschätzung der bereinigten Mengengebühr  $0,44 \text{ € m}^{-3}$ .

## 6.6 Beurteilung der Validierungsergebnisse

Obwohl die im Modul *KA* integrierte Bemessungsrichtlinie DWA-A-131 (2016) und ihre Vorgängerversion ATV-DVWK-A131 (2000) seit Jahrzehnten in Deutschland und Europa angewandt wird, ist in der Literatur kein Vergleich von Bemessungsergebnissen und Messwerten zu finden. Auf Basis der Angleichung des ASM 3 mit dem fraktionierten CSB-Ansatzes der ATV-DVWK-A131 (2000) von Alex et al. (2015) führte Ahnert et al. (2015) einen Ergebnisvergleich durch. Dabei ergab die Gegenüberstellung, dass die Abweichung der meisten betrachteten Parameter kleiner als 5 % betrug und somit eine Übereinstimmung festzustellen war (Ahnert et al. 2015). Im Zuge der Erkenntnis, dass solche Modelle repräsentative Ergebnisse zur Bemessungsrichtlinie erzeugen, wurden für die Bewertung der Validierung Studienergebnisse basierend auf ASM und BSM für einen Vergleich der prozessbasierten Parameter des Moduls *KA* herangezogen. Beruhend auf dem BSM 2-P bildeten Mbamba et al. (2016) eine großtechnische *KA* ab. Die Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten TS betrug 1 % bis 45 %, beim TS des zu entsorgenden Schlammes -17,8 % bis 5,9 %, bei P 4 % bis 15 % und bei NH<sub>4</sub>-N 1 % bis 44 %. Aufgrund der hohen Abweichungen beim TS lag bei der Simulation der Biogasferzeugung eine Überschätzung von 34 % vor. Milathianakis (2017) modellierte die *KA* von Duvbacken (Gävle, Schweden) mittels BioWin®. Bei der Validierung ergab sich eine

Abweichung bei der Schlammproduktion für TS von -21,5 %, was sich wiederum auf die Biogasproduktion mit einer Spanne von -39,2 % bis -30,4 % auswirkte. Die KA von Vale Faro wurde von Viegas (2016) basierend auf dem ASM 1 mit der Simulationssoftware GPS-X modelliert. Die Abweichungen zu den Messwerten betrugen beim CSB in der Hochsaison (Juli bis September) -0,8 % und in der Nebensaison (November bis Mai) 0,4 %, beim BSB<sub>5</sub> -79,2/83,3 % und bei den *Schlamm-mengen* -2,2/1,3 %. Sabri et al. (2017) erstellte, basierend auf dem ASM1 mittels des GPS-X Simulators, Modelle der KA Souk-Ahras und Sedrata (Algerien). Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde in dieser Studie die mittlere quadratische Abweichung (RMSE) berechnet. Die berechnete Fehlerquote in Souk-Ahras betrug 27 % beim BSB<sub>5</sub> und 11 % beim CSB und in Sedrata 21 % beim BSB<sub>5</sub> und 16 % beim CSB. Im Vergleich zu den Angaben in der Literatur bezüglich der Simulationsgenauigkeit, weisen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung eine größere Abweichung bei der Simulation der *Schlamm-mengen* auf (Spannweite beträgt -44 % bis 36 %). Unter anderem kann dies in der Betrachtung von unterschiedlichen GK begründet sein. Während in den aufgezeigten Studien KA der GK 4 bis GK 5 untersucht wurden, sind in der vorliegenden Untersuchung hauptsächlich KA der GK 1 betrachtet worden. Die *Schlamm-mengen* von KA 12, welche der GK 5 angehört, konnten mit einer hohen Genauigkeit (-0,4 %) berechnet werden und liegen im Bereich der Studien von Viegas (2016) sowie Neumann und Vanrolleghem (2011). In Anlehnung an die Validierung der simulierten Gasproduktion von Mbamba et al. (2016) und Milathianakis (2017), wurde in dieser Untersuchung bei der *erzeugten elektrischen Energie* mit einer Abweichung von -1,2 % ein um ein Vielfaches genaueres Ergebnis erzielt. Die Abweichung bei der simulierten P-Konzentration überträgt sich auf die simulierte *Fällmittelmenge*, welche eine Abweichung von 5,6 % aufweist, sich aber im Bereich der Abweichungen aus den genannten Studien befindet.

Die Überlebensfunktionen des Moduls *SWEN* tendieren zur Überschätzung der Überlebensraten und der verbleibenden Lebenserwartung. Diese Anomalie wird als selektive Überlebensverzerrung bezeichnet (Le Gat 2008). Obwohl zahlreiche Studien existieren, gibt es keine klaren Aussagen über die Vorhersagegenauigkeit. Dies liegt an der Qualität und Menge der für die Kalibrierung zur Verfügung stehenden Daten. In vielen Fallstudien liegt oft keine Kalibrierung der Alterungsvektoren vor, da lediglich Befährungsdaten eines kleinen Teils vom Gesamtnetz vorliegen und diese nicht ausreichen (Kley und Caradot 2013).

Ergebnisse aus Studien von Kostenanalysemodellen der Abwasserwirtschaft basieren häufig auf durch DEA hergeleiteten Regressionsfunktionen, deren Genauigkeit sich über das Bestimmtheitsmaß zeigt. In der vorliegenden Arbeit wurde die Genauigkeit über die absolute und relative Abweichung beschrieben. Dadurch und durch den Mangel an Studien zur Abbildung ganzheitlicher Kostenstrukturen in der Abwasserwirtschaft ist ein Vergleich zu Resultaten aus der Literatur nicht möglich. Benedetti et al. (2006b) begründeten diesen Mangel mit der Strukturkomplexität und spezifischen Charakteristik. Denn hinsichtlich nationaler und regionaler unterschiedlicher Rahmenbedingungen sowie Planungs- und Bauverfahren kommt es zur größeren Varianz bei den Kosten (Bode und Lemmel 2001).

## 7. Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Rahmenparametereinflusses auf die Mengengebührenentwicklung

Die nachfolgende Sensitivitätsanalyse dient zur Untersuchung des Einflusses der einzelnen Rahmenparameter auf die Gebührenentwicklung. Für die separate Betrachtung des Rahmenparametereinflusses wurde beim Rahmenparameter *Bevölkerung* eine Spannweite für die Sensitivitätsanalyse von -30 % bis 30 % festgelegt. Beim Rahmenparameter *Wasserverbrauch* beträgt die Spannweite -20 % bis 20 %. Es wurden bewusst große Spannweiten gewählt, um den direkten Einfluss dieser Rahmenparameter ersichtlich zu machen und aufzuzeigen wie empfindlich das Gesamtsystem (Schmutzwasserentsorgung des Aufgabenträgers) auf die Veränderung dieser Parameter reagiert. Als Betrachtungsgröße wurden hierfür die Gesamtkosten und die Mengengebühr als Modellausgaberesultat verwendet. Bei der Untersuchung wurde neben der negativen - im Gegensatz zu den zu erwartenden Realbedingungen - auch die positive Ausprägung dieser Rahmenparameter mit betrachtet. Mittels der Sensitivitätsanalyse beider Rahmenparameter *Bevölkerung* und *Wasserverbrauch* können demografische und sozioökonomische Einflüsse in einer breiten Range für den betrachteten Aufgabenträger abgeschätzt werden. Für die Bestimmung des Einflusses der wirtschaftlichen Faktoren im Modell sind die Rahmenparameter *Inflation* und *Zinsen* zu untersuchen. Die Festlegung der Spannweiten für beide Rahmenparameter erfolgte im Bereich, welcher aus der Langzeitreihenanalyse hervorging. Demnach wurde für die *Inflation* eine Spannweite von 0 % bis 4 % und für den *Zinssatz* von 0 % bis 8 % definiert. Neben der separaten Einzelbetrachtung wurde zusätzlich die Überlagerung mit den übrigen Rahmenparametern mit deren in Kap. 4.3.4 definierten Ausprägungen in den Szenarien betrachtet. Dabei erfolgte die Einzelbetrachtung der Rahmenparameter in einem Nullszenario (Sz 0), in welchem die übrigen Rahmenparameter aus der Betrachtung ausgeschlossen worden sind. Für die Betrachtung der Überlagerungseffekte wurde die Spannweite des betrachteten Rahmenparameters beibehalten und für die übrigen Rahmenparameter die Werte aus den drei Szenarien verwendet. Auf diese Weise erfolgte für dieselbe Spannweite eine zusätzliche Berechnung mit den Werten des Positiv- (Sz I), Real- (Sz II) und Negativszenarios (Sz III). Betrachtungsgegenstand für die Auswertung sind jeweils die Ergebnisse zum Ende des Prognosezeitraumes.

### 7.1 Bevölkerungs- und Schmutzwassermengenveränderung

Als zentraler Kennwert dieser Untersuchung steht im Zusammenhang mit dem demografischen Wandel die relative Veränderung der *Bevölkerung*. Die Effekte einer negativen sowie positiven Bevölkerungsentwicklung auf die relative Gesamtkosten- und Mengengebührenentwicklung sind separat sowie mit Überlagerung der anderen Rahmenparameter (in Form der definierten Szenarien) für den exemplarischen Aufgabenträger in Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 abgebildet.

7. Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des  
Rahmenparametereinflusses auf die Mengengebührenentwicklung

**Tabelle 7-1:** Auswirkung der rel. Bevölkerungsveränderung auf die rel. Entwicklung der Gesamtkosten

Bev (%)	EB (Sz 0) (%)	Ü mit Sz I (%)	Ü mit Sz II (%)	Ü mit Sz III (%)
-30	-3,3	-3,3	-2,7	-2,8
-25	-2,8	-2,8	-2,2	-2,4
-20	-2,3	-2,3	-1,8	-1,9
-15	-1,7	-1,7	-1,4	-1,5
-10	-1,2	-1,2	-0,9	-1,0
-5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5
0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,6	0,6	0,5	0,5
10	1,2	1,2	1,0	1,0
15	1,9	1,9	1,4	1,6
20	2,5	2,5	2,0	2,1
25	3,2	3,2	2,5	2,7
30	3,9	3,9	3,0	3,2

**Tabelle 7-2:** Auswirkung der rel. Bevölkerungsveränderung auf die rel. Entwicklung der Mengengebühr

Bev (%)	EB (Sz 0) (%)	Ü mit Sz I (%)	Ü mit Sz II (%)	Ü mit Sz III (%)
-30	10,6	9,9	9,1	8,9
-25	8,7	8,1	7,5	7,3
-20	6,8	6,3	5,9	5,7
-15	5,0	4,7	4,3	4,2
-10	3,2	3,0	2,8	2,8
-5	1,6	1,5	1,4	1,4
0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	-1,5	-1,4	-1,4	-1,3
10	-3,0	-2,8	-2,7	-2,6
15	-4,4	-4,1	-3,9	-3,8
20	-5,7	-5,3	-5,1	-5,0
25	-7,0	-6,5	-6,3	-6,2
30	-8,2	-7,7	-7,5	-7,3

EB: Einzelbetrachtung, Ü: Überlagerung des betrachteten Rahmenparameters mit den anderen Rahmenparametern mit den Werten aus den jeweiligen Szenarien

Bei Sz 0 wirkt sich die Veränderung der *Bevölkerungszahl* innerhalb der betrachteten Spannweite auf die Gesamtkosten von -3,3 % (-196 T€) bis 3,9 % (231 T€) aus. Durch die Verringerung der Gebührenzahler werden die Kosten bzw. Einsparungen auf die Übrigen verlagert, weshalb sich dies auf die Mengengebührenentwicklung bei gleichbleibenden Bedingungen mit einer Änderung von -8,2 % ( $-0,26 \text{ € m}^{-3}$ ) bis 10,6 % ( $0,33 \text{ € m}^{-3}$ ) auswirkt. Im Sz I erfolgt eine Überlagerung zwischen der Veränderung der *Bevölkerungszahl* und einem Anstieg des häuslichen *Wasserverbrauchs* von 10 %. Die Gesamtkosten bleiben im Vergleich zu Sz 0 unverändert. Hinsichtlich der größeren Schmutzwassermengen kommt es zu einer Mengengebührenveränderung von -7,7 % ( $-0,23 \text{ € m}^{-3}$ ) bis 9,9 % ( $0,30 \text{ € m}^{-3}$ ). Generell ist festzuhalten, dass der zusätzliche *Wasserverbrauch* den Effekt des *Bevölkerungsrückganges* abmindert. Eine Steigerung des *Wasserverbrauchs* um 10 % bei einer *Bevölkerungszunahme* von 30 % bewirkt eine zusätzliche Mengengebührensensenkung von -3,1 % ( $-0,09 \text{ € m}^{-3}$ ) und bei einer *Bevölkerungsreduktion* um -30 % würde die Mengengebühr um -4,2 % ( $-0,15 \text{ € m}^{-3}$ ) niedriger sein. In Sz II liegt keine Veränderung des *Wasserverbrauchs* vor, jedoch kommt es hier zu einer Überlagerung des Inflations- und Zinseffektes, mit einer jährlichen *Inflationsrate* von 1,5 % und einer *Zinsrate* von 2 %. Durch die höheren Gesamtkosten führt eine *Bevölkerungsreduktion* zu einer höheren Pro-Kopf-Belastung (PKB) durch die Umlegung der Kosten auf die übrige Bevölkerung. Im Rahmen der in diesem Szenario definierten Bedingungen wirkt sich eine Veränderung der *Bevölkerungszahl* auf die Gesamtkosten mit -2,7 % (-296 T€) bis 3,0 % (590 T€) aus. Im Vergleich zu den Rahmenbedingungen von Sz 0 und Sz I ist eine Verringerung des Einflusses der *Bevölkerungsveränderung* auf die Gesamtkosten festzustellen. Die Entwicklung der *Bevölkerungszahl* in Bezug zu diesem Szenario zeigt einen Effekt innerhalb einer Spanne von -7,5 % ( $-0,47 \text{ € m}^{-3}$ ) bis 9,1 % ( $0,57 \text{ € m}^{-3}$ ). Bei Sz III kommt es zu einer Überlagerung der Auswirkungen durch die Rahmenbedingungen. Neben der Veränderung der *Bevölkerungszahl*, einer höheren *Inflationsrate* von

## 7. Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Rahmenparametereinflusses auf die Mengengebührenentwicklung

2,5 % und Zinsrate von 4,0 %, wirkt zusätzlich eine Verringerung des häuslichen *Wasserverbrauchs* von 11 % auf die Kostenentwicklung. Unter diesen Bedingungen beeinflusst die *Bevölkerungs-* die Gesamtkostenentwicklung in einer Spanne von -2,8 % (-486 T€) bis 3,2 % (562 T€). Ein hypothetischer *Bevölkerungszuwachs* von 30 % würde der Mengengebührenentwicklung um -7,3 % (-0,76 € m<sup>-3</sup>) entgegenwirken. Dementgegen wirkt sich eine *Bevölkerungsreduktion* von 30 % aus, dies würde zu einer zusätzlichen Mengengebührensteigerung um 9,1 % (0,93 € m<sup>-3</sup>) führen.

Der Einfluss des häuslichen *Wasserverbrauchs* und der damit verbundenen Schmutzwassermengenveränderung in Bezug zur Gesamtkosten- und Mengengebührenentwicklung ist separat sowie mit Überlagerung der anderen Rahmenparameter in Tabelle 7-3 und Tabelle 7-4 dargestellt.

**Tabelle 7-3:** Auswirkung der relativen Veränderung des häuslichen Wasser-verbrauchs auf die rel. Entwicklung der Gesamtkosten

Bev (%)	EB (Sz 0) (%)	Ü mit Sz I (%)	Ü mit Sz II (%)	Ü mit Sz III (%)
-20,0	-1,2	-1,2	-1,0	-1,3
-17,5	-1,0	-1,0	-0,9	-1,1
-15,0	-0,9	-0,9	-0,7	-0,9
-12,5	-0,7	-0,7	-0,6	-0,8
-10,0	-0,6	-0,6	-0,5	-0,6
-7,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5
-5,0	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3
-2,5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,5	0,1	0,1	0,1	0,2
5,0	0,3	0,3	0,2	0,3
7,5	0,4	0,4	0,4	0,5
10,0	0,6	0,6	0,5	0,6
12,5	0,7	0,7	0,6	0,8
15,0	0,9	0,9	0,7	0,9
17,5	1,0	1,0	0,8	1,1
20,0	1,2	1,2	1,0	1,2

**Tabelle 7-4:** Auswirkung der relativen Veränderung des häuslichen Wasser-verbrauchs auf die rel. Entwicklung der Mengengebühr

Bev (%)	EB (Sz 0) (%)	Ü mit Sz I (%)	Ü mit Sz II (%)	Ü mit Sz III (%)
-20,0	8,6	8,6	7,2	6,9
-17,5	7,4	7,4	6,2	6,0
-15,0	6,2	6,2	5,2	5,0
-12,5	5,1	5,1	4,3	4,2
-10,0	4,0	4,0	3,4	3,3
-7,5	3,0	3,0	2,5	2,4
-5,0	2,0	2,0	1,7	1,6
-2,5	1,0	1,0	0,8	0,8
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,5	0,0	0,0	-0,8	-0,8
5,0	-0,9	-0,9	-1,6	-1,5
7,5	-1,8	-1,8	-2,3	-2,3
10,0	-2,7	-2,7	-3,1	-3,0
12,5	-3,5	-3,5	-3,8	-3,7
15,0	-4,3	-4,3	-4,5	-4,4
17,5	-5,1	-5,1	-5,2	-5,1
20,0	-5,9	-5,9	-5,9	-5,8

EB: Einzelbetrachtung, Ü: Überlagerung des betrachteten Rahmenparameters mit den anderen Rahmenparametern mit den Werten aus en jeweiligen Szenarien

Da eine Erhöhung oder Senkung des häuslichen *Wasserverbrauchs* zu keiner Frachterhöhung bzw. -senkung führt, beeinflusst dieser Rahmenparameter nur im geringen Maße die Gesamtkostenentwicklung. Innerhalb der betrachteten Spannweite des Rahmenparameters resultiert eine maximale Beeinflussung der Gesamtkosten über alle vier Szenarien von -1,3 % bis 1,2 %. Bei der Mengengebühr wird eine Steigerung der Gesamtkosten durch die zusätzliche Schmutzwassermenge kompensiert und führt insgesamt zur einer Gebührenreduktion. Gegenteilig verhält es sich bei der Reduktion der Schmutzwassermenge. Die Gesamtkosten sinken zwar geringfügig, führen durch die geringe Wasserverbrauchsmenge als Bemessungsmaßstab aber zu einer Gebührenerhöhung. Unter Ausschluss der anderen Rahmenparameter (gilt für Sz 0 und Sz I) resultiert aus der Spanne des Wasserverbrauchs eine

## 7. Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Rahmenparametereinflusses auf die Mengengebührenentwicklung

---

Mengengebührenentwicklung von -5,9 % ( $-0,19 \text{ € m}^{-3}$ ) bis 8,6 % ( $0,27 \text{ € m}^{-3}$ ). Bei einer Überlagerung mit einer *Bevölkerungsreduktion* von 20 % und der in Sz II definierten *Inflation* und *Zinssatz*, führt die Spanne der *Wasserverbrauchsveränderung* zu einer Mengengebührenentwicklung von -5,9 % ( $-0,37 \text{ € m}^{-3}$ ) bis 7,2 % ( $0,45 \text{ € m}^{-3}$ ). Durch die Erhöhung der Ausprägungen der einzelnen Rahmenparameter in Sz III beeinflusst die *Wasserverbrauchsveränderung* die Mengengebührenentwicklung in einer Spanne von -5,8 % ( $-0,58 \text{ € m}^{-3}$ ) bis 6,9 % ( $0,70 \text{ € m}^{-3}$ ).

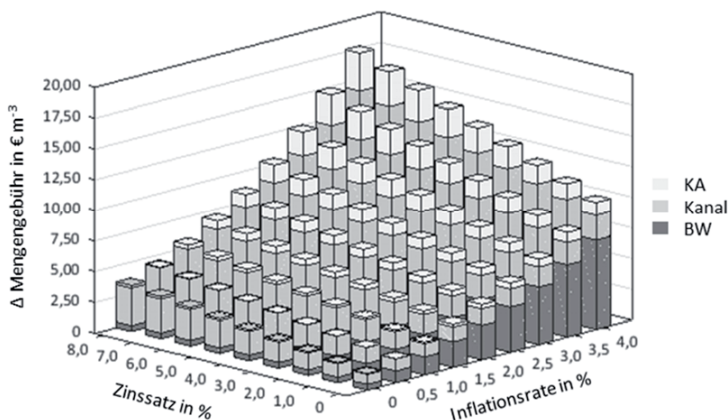
Die dargestellten Kostenentwicklungen beziehen sich auf die Annahme, dass die Anzahl der Haushalte (Einleiterzahl) unverändert bleibt (Annahme des Aufgabenträgers). Ohne Neuerschließungen oder Rückbau von Anschlüssen führt eine Ab- oder Zunahme der *Bevölkerung* lediglich zu einer Veränderung der Haushaltgröße. Für den Fall, dass Grundstücke unbewohnt wären, kann sich dies in Abhängigkeit von der Satzung neben der Schmutzwassermenge auch auf die Anzahl gebührenpflichtiger Zahler der Grundgebühr auswirken. Der zusätzliche Effekt, bei Extrahierung der anderen Rahmenparameter, so dass ausschließlich der Wegfall der Grundgebühr je Einleiter betrachtet wird, würde bei Annahme konstanter Gesamtkosten und einer Reduktion der Einleiterzahl von 15 % (Äquivalent zu 30 % Bevölkerungsreduktion bei Annahme von ZPH je Anschluss) zu einer zusätzlichen Erhöhung der Mengengebühr von  $0,17 \text{ € m}^{-3}$  führen.

### 7.2 Inflationsrate und Zinssatz

Durch die Wechselwirkung der *Inflation* und dem *Kreditzinssatz* auf die Kapitalkosten werden folgend beide Parameter zusammen betrachtet. Während die *Inflation* auf alle Kostenarten wirkt, wirkt der *Kreditzinssatz* ausschließlich auf die Zinskosten. Zur Beschreibung der Effekte bei einer Überlagerung beider Parameter sind in Abbildung 7-1 die Mengengebührenentwicklung bei unterschiedlichen *Inflationsraten* und *Kreditzinssätzen* hinsichtlich der Kapitalkosten (*Zinskosten*, *Abschreibungen*) durch die Investitionskosten für KA und das SWEN (Kanal) sowie der Betriebs- und Wartungskosten (BW) des exemplarischen Aufgabenträgers abgebildet. In den Betriebs- und Wartungskosten sind die Kapitalkosten extrahiert. Die dargestellten Mengengebührenveränderungen beziehen sich auf das Ende des Prognosezeitraumes in 2050.



## 7. Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Rahmenparametereinflusses auf die Mengengebührenentwicklung

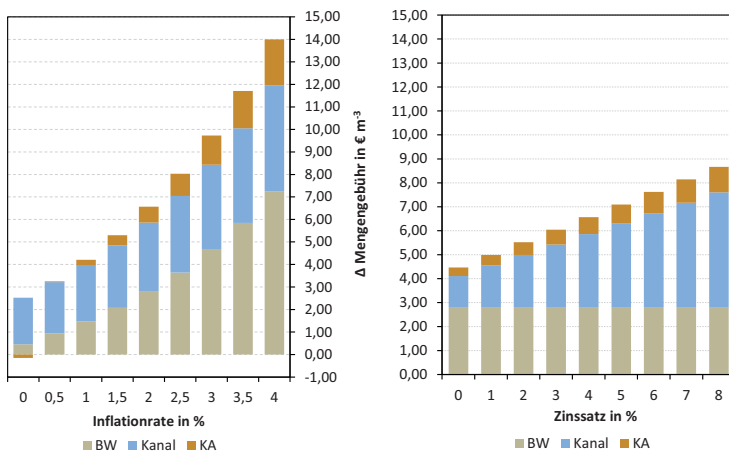


**Abbildung 7-1:** Auswirkung von Inflationsrate und Kreditzinssätze auf die Mengengebührenentwicklung durch Investitionen in KA, SWEN sowie Betriebs- und Wartungskosten (BW)

Die Überlagerung der *Inflation* mit den *Kreditzinsen* zeigt, dass die *Inflationsrate* der stärkere Gebührentreiber ist. Denn die *Inflation* bewirkt eine Preissteigerung bei sämtlichen Betriebs- und Wartungskosten als auch auf die Kapitalkosten, durch die Teuerung der zu tätigen Investitionen. Bei einer *Inflationsspanne* von 0 % bis 4 % sowie einem *Kreditzinssatz* von 4 %, würden sich die Mengengebühren um 2,37  $\text{€ m}^{-3}$  bis 14,00  $\text{€ m}^{-3}$  erhöhen. Auf historische Sicht betrachtet ist eine *Inflationsrate* von 4 % über einen längeren Zeitraum als unwahrscheinlich anzusehen. Insgesamt war die *Inflationsrate* beim BPI nur in 6 Jahren höher als 4 % und nur in 9 Jahren höher als 3 % (Langzeitreihen in Kap. 4.3.2). Bei Annahme einer mittleren *Inflationsrate* von 2,5 % und einem *Kreditzinssatz* von 4 % würde eine Erhöhung der Mengengebühren um 6,77  $\text{€ m}^{-3}$  resultieren, davon wären 1,07  $\text{€ m}^{-3}$  für die Kapitalkosten der KA, 2,51  $\text{€ m}^{-3}$  für die Kapitalkosten des SWEN und 3,19  $\text{€ m}^{-3}$  für die Betriebs- und Wartungskosten. Der Einfluss des *Kreditzinssatzes* auf die Verbindlichkeiten bewirkt innerhalb einer Spanne von 0 % bis 8 % eine Erhöhung bei den Mengengebühren von 4,47  $\text{€ m}^{-3}$  bis 8,67  $\text{€ m}^{-3}$ .

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 7-2 die *Inflationseffekte* (links) bei einem *Kreditzinssatz* von 4 % und *Kreditzinseffekte* (rechts) bei einer *Inflationsrate* von 2,5 % aufgeführt.

## 7. Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Rahmenparametereinflusses auf die Mengengebührenentwicklung

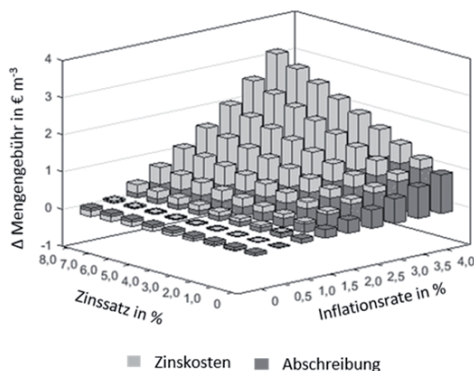


**Abbildung 7-2:** Einzelbetrachtung des Inflationseffektes bei einem Kreditzinssatz von 4 % (links) und des Zinseffektes bei einer Inflationsrate von 2,5 % (rechts)

Im Folgenden findet eine detailliertere Betrachtung der Wirkungsweise der *Inflation* und des *Kreditzinssatzes* auf die Kapitalkosten der KA und des SWEN statt.

### Kläranlagen

Die in Abbildung 7-2 dargestellten, durch *Inflation* und *Kreditzinsen* beeinflussten, Kapitalkosten der KA-Reinvestitionen sind in Abbildung 7-3 in *Zinskosten* und *Abschreibungen* unterteilt.



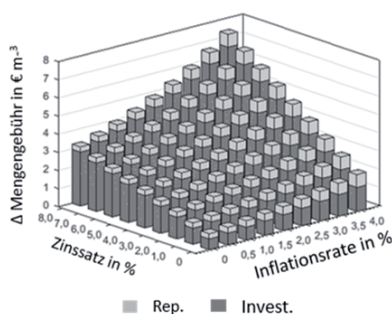
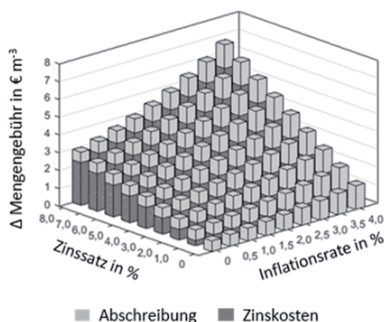
**Abbildung 7-3:** Auswirkung von Inflationsrate und Kreditzinssatz auf die Mengengebührenentwicklung durch Abschreibungen und Zinskosten für Reinvestitionen der KA

## 7. Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Rahmenparametereinflusses auf die Mengengebührenentwicklung

Innerhalb der betrachteten Spanne der *Inflationsraten* würden sich die *Abschreibungen* auf die Mengengebührenentwicklung von  $-0,08 \text{ € m}^{-3}$  bis  $1,03 \text{ € m}^{-3}$  auswirken. In Abhängigkeit zur *Inflation* steigen die Investitionskosten und gekoppelt mit steigenden *Kreditzinssätzen* führt dies zu einer überproportionalen Steigerung der *Zinskosten*, welche zu einer Mengengebührenbeeinflussung von  $-0,15 \text{ € m}^{-3}$  bis  $2,06 \text{ € m}^{-3}$  beitragen.

### Schmutzwasserentsorgungssystem

Für die Betrachtung der Auswirkungen der *Inflation* und *Kreditzinsen* für die Investitionen in das SWEN erfolgt in Abbildung 7-4 ebenfalls die Unterteilung der Kapitalkosten in *Zinskosten* und *Abschreibungen*. Zusätzlich sind in Abbildung 7-5 die, durch *Inflation* beeinflussten, Kanalreparaturkosten den Kapitalkosten des SWEN ergänzt, um auf diese Weise die Instandhaltungskosten darzustellen.



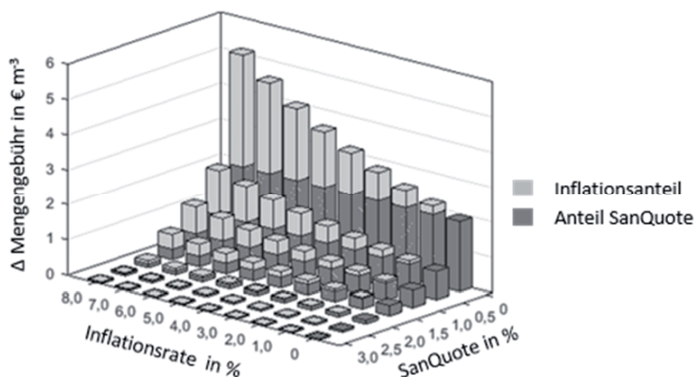
**Abbildung 7-4:** Auswirkungen der Inflationsrate und des Kreditzinssatzes auf die Mengengebührenentwicklung durch Abschreibungen und Zinskosten des SWEN

**Abbildung 7-5:** Auswirkungen der Inflationsrate und des Kreditzinssatzes auf die Mengengebührenentwicklung durch Instandhaltungskosten des SWEN

Innerhalb der Spanne der betrachteten Inflationsraten beträgt die Mengengebührenveränderung durch die *Abschreibungen*  $0,59 \text{ € m}^{-3}$  bis  $1,33 \text{ € m}^{-3}$ . Durch die Einflussnahme der Inflation auf die Baupreise und den damit verbundenen Verbindlichkeiten zur Finanzierung können *Zinskosten* einen Einfluss auf die Gebührenentwicklung von 0 bis  $5,32 \text{ € m}^{-3}$  haben. Neben den Kapitalkosten, welche den größten Teil der Instandhaltungskosten für das SWEN darstellen, setzt sich der kleinere Teil aus den Reparaturkosten zusammen. Im Zuge einer vorherigen Analyse der Kosten- und Kanalzustandsentwicklung bei unterschiedlichen Sanierungsquoten (Anhang 16 und Anhang 17) wurde in Absprache mit dem Aufgabenträger für die weitere Betrachtung und spätere Prognosesimulation eine jährliche Sanierungsquote von 1,5 % (bezogen auf die Gesamtlänge des SWEN) festgelegt. In Anbetracht dieser Quote würde sich innerhalb der betrachteten Inflationsspanne die Mengengebühr zusätzlich um  $0,29 \text{ € m}^{-3}$  bis  $0,71 \text{ € m}^{-3}$  erhöhen.

## 7. Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Rahmenparametereinflusses auf die Mengengebührenentwicklung

Eine Darstellung der Leitungsreparaturkosten bei Sanierungsquoten von 0 bis 3 % unter Berücksichtigung der Inflation ist in Abbildung 7-6 illustriert.

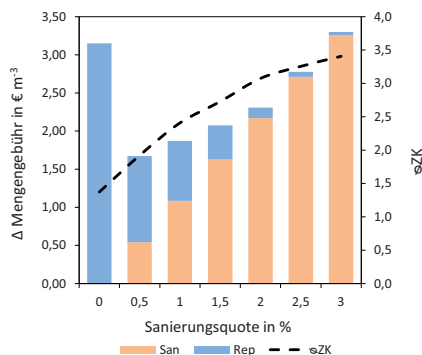


**Abbildung 7-6:** Entwicklung der Mengengebühr durch Überlagerung von Inflation und Sanierungsquote

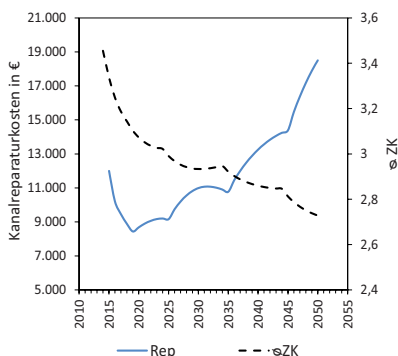
Mit steigender Sanierungsquote ist der Anteil der Leitungen, welcher sich in einem schlechten Kanalzustand befindet und reparaturbedürftig ist, umso geringer. Bei hohen Sanierungsquoten von 2 % bis 3 % bedarf es eines geringen Aufwands für Kanalreparaturen, dies würde sich in der Mengengebührenentwicklung mit einer Erhöhung von  $0,04 \text{ € m}^{-3}$  bis  $0,10 \text{ € m}^{-3}$  widerspiegeln. Selbst bei einer hohen *Inflationsrate* von 4 %, würde sich dies mit lediglich  $0,06 \text{ € m}^{-3}$  bis  $0,19 \text{ € m}^{-3}$  zusätzlich auf die Mengengebühr auswirken. Bei geringeren Sanierungsquoten erhöht sich der Anteil an Leitungsbeständen im schlechten Zustand, so dass bei Sanierungsquoten von 0,5 % bis 1,5 % zu einer durch Reparaturkosten bedingten Mengengebührenerhöhung von  $0,29 \text{ € m}^{-3}$  bis  $0,79 \text{ € m}^{-3}$  käme. Durch die höheren Kosten wirkt sich hier eine höhere *Inflation* mit  $0,03 \text{ € m}^{-3}$  bis  $1,30 \text{ € m}^{-3}$  zusätzlich aus. Für den Fall, dass die Systeme auf Verschleiß betrieben werden und keine Sanierung stattfinden würde, würde sich die Mengengebühr um bis zu  $1,97 \text{ € m}^{-3}$  erhöhen. Durch die *Inflation* könnte es zusätzlich zu einer Steigerung von  $3,16 \text{ € m}^{-3}$  kommen.

In Abbildung 7-7 sind die mittleren ZK für das gesamte SWEN, welche sich bei den jeweiligen Sanierungsquoten ergeben und unter Berücksichtigung einer *Inflation* von 2,5 % sowie eines *Zinssatzes* von 4 % der resultierenden Mengengebührveränderung gegenübergestellt. Des Weiteren sind in Abbildung 7-8 die jährlichen Reparaturkosten, welche sich bei einer Sanierungsquote von 1,5 % und ohne inflationäre Einflüsse ergeben würden, den mittleren ZK des SWEN über den Prognosezeitraum in Relation gesetzt.

## 7. Sensitivitätsanalyse zur Bewertung des Rahmenparametereinflusses auf die Mengengebührentwicklung



**Abbildung 7-7:** Auswirkung der Sanierungsquote auf die mittlere ZK des SWEN und der Mengengebührentwicklung bei einer Inflationsrate von 2,5 % und einem Kreditzinssatz von 4 %



**Abbildung 7-8:** Entwicklung der jährlichen Reparaturkosten und der mittleren ZK des SWEN bei einer Sanierungsquote von 1,5 % (ohne inflationäre Einflüsse)

In Anbetracht der angenommenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die weiterführende Betrachtung (*Inflation 2,5 %* und *Kreditzinssatz 4 %*) würde sich für 2050, in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie und der damit verbundenen Sanierungsquote, eine Mengengebührrhöhung von 2,12 € m<sup>-3</sup> bis 4,12 € m<sup>-3</sup> ergeben (Abbildung 7-7). Die mittlere ZK beliefte sich, ohne Sanierung durch den stetigen Zerfall, auf einen Wert von 1,4 und wäre damit größtenteils in einem schlechten *Zustand* (DWA-M-149-3 2015). Bei einer ambitionierten Sanierungsstrategie mit einer Quote von 3 % würde sich, in Gesamtbetrachtung des Netzes, die ZK auf 3,4 belaufen und wäre damit in einem sehr guten *Zustand*. Bezogen auf die für die Untersuchung festgelegte Sanierungsquote von 1,5 % würde es, durch die Erneuerungs- und Renovierungskosten bis 2050, zu einer Erhöhung der Mengengebühren von 2,04 € m<sup>-3</sup> kommen. Durch Reparaturkosten kämen nochmal 0,50 € m<sup>-3</sup> dazu. Wegen des gegenwärtigen mittleren Alters von 21 Jahren (Stand 2014) und einer mittleren ZK von 3,4, findet (vgl. Abbildung 7-8) in den ersten Jahren durch den normalen Lebenszyklus der Kanäle eine rapide Verschlechterung des *Zustandes* statt. Bis 2018 sinken die Reparaturkosten zunächst um 29,7 % (von 2015 und exkl. inflationäre Verteuerung). Durch die anschließende Zunahme des Leitungsanteils in ZK 2 (Anhang 16) in den darauffolgenden Jahren, steigen diese bis 2050 stetig an und erhöhen sich ausgehend von 2018 um 58,6 %. Der *Kanalzustand* würde sich im Mittel nur um 0,73 verschlechtern und am Ende des Prognosezeitraumes 2,73 betragen. Doch im Vergleich zu den anderen Varianten mit einer geringeren Sanierungsquote, befindet sich der größte Teil des Kanalnetzes in ZK 3. Schmutzwasserleitungen mit einer Einstufung in ZK 0 und ZK 1 wären nicht vertreten. Ein besserer *Zustand* könnte durch eine höhere Sanierungsquote zwar erreicht werden, doch würde dies mit höheren Kosten einhergehen. Im Sinne der Verhältnismäßigkeit sollte die Sanierungsquote für den betrachteten Fall zwischen 1 % und 2 % liegen, weshalb 1,5 % als zielführendes Mittelmaß gewertet werden kann.

### 7.3 Zusammenfassende Wirkungsbetrachtung der Rahmenparameter auf die Mengengebührenentwicklung

Im Anschluss an die zuvor dargestellten Ergebnisse über die Wirkungsweise der Rahmenparameter, folgt eine zusammenfassende Gegenüberstellung der jeweiligen Mengengebührenbeeinflussung bei sowohl isolierter Betrachtung der einzelnen Rahmenparameter als auch in Wechselwirkung untereinander, in Form daraus resultierender Maximalwerte in Tabelle 7-5. Damit die Werte vergleichbar sind und korrekt in Relation stehen, wurden für den Vergleich die Spannweiten der Rahmenparameter aus den Szenarien übertragen.

**Tabelle 7-5:** Spannweite der Mengengebührenbeeinflussung durch die Rahmenparameter

Rahmenparameter	Betrachtungs- spannweite (%)	Spannweite der Mengengebühren- beeinflussung (€ m <sup>-3</sup> )	Maximale Mengengebühren- beeinflussung bei Überlagerung der Rahmenparameter im Negativszenario (€ m <sup>-3</sup> )
Bevölkerung	[-30 ; 30]	[-0,26 ; 0,33]	0,93
Inflation	[0 ; 4]	[0 ; 9,06]	5,66
Kreditzinssatz	[0 ; 8]	[0 ; 2,22]	1,11
Wasserverbrauch	[-20 ; 20]	[-0,19 ; 0,27]	0,33

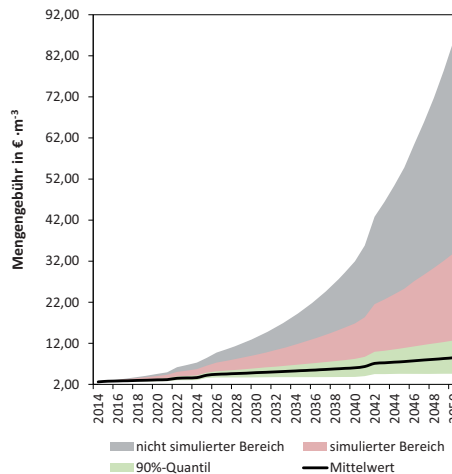
Die Spannweiten der Mengengebührenbeeinflussung beschreiben den separaten Effekt des Parameters auf die Gebührenentwicklung. Im Rahmen einer *Bevölkerungsveränderung* in einer Spanne von -30% bis 30 % würde dies einen Effekt auf die Mengengebühr von -8 % (-0,26 € m<sup>-3</sup>) bis 11 % (0,33 € m<sup>-3</sup>) bedeuten. Bei einer Überlagerung mit den maximalen Ausprägungen der anderen Rahmenparameter beträgt in Sz III die maximale durch die *Bevölkerungsentwicklung* verursachte Gebührenerhöhung 12 % (0,93 € m<sup>-3</sup>) betragen. In Bezug auf die betrachtete Spanne der *Wasserverbrauchsänderungen* der Haushalte, beträgt der Effekt auf die Gebühr -6 % (-0,19 € m<sup>-3</sup>) bis 9 % (0,27 € m<sup>-3</sup>). Aus der Überlagerung der maximalen Ausprägung der anderen drei Rahmenparameter gemäß Sz III würde eine Steigerung der Mengengebühr von 4 % (0,33 € m<sup>-3</sup>) resultieren. Bei einer kontinuierlichen *Inflationsrate* von 4 % über den gesamten Betrachtungszeitraum würde dies einen inflationsbedingten Mengengebührenanstieg von 9,06 € m<sup>-3</sup> bedeuten. Die *Inflation* ist der maßgebende Gebährentreiber, sie wirkt auf alle Preise und Kosten. Auch die *Zinskosten* stehen in indirekter Abhängigkeit zur Inflation. Denn bei steigenden Investitionskosten steigen, auch bei gleichbleibenden *Kreditzinssätzen*, die *Zinskosten*. Bei Außerachtlassung der *Inflation* ergibt sich bei einem maximal angenommenen *Kreditzinssatz* von 8 % ein Effekt auf die Gebührenentwicklung von 2,22 € m<sup>-3</sup>. Mit Berücksichtigung der inflationsbedingten Zinskostensteigerung beträgt der durch die Inflation verursachte Gebührenanstieg in SZ III insgesamt 5,66 € m<sup>-3</sup>. Für die Gebührenentwicklung ist das Zusammenspiel zwischen der *Inflation* und dem *Zinssatz* entscheidend.

Im nächsten Kapitel werden die Effekte sich überlagernder Rahmenparameter wirtschaftlich und technisch quantifiziert. Als Überblick über die möglichen Spannweiten einer sich daraus ergebenden Gebührenentwicklung erfolgt im ersten Abschnitt die Auswertung der Ergebnisse aus der MCS. Zur detaillierteren Betrachtung findet im darauffolgenden Abschnitt anhand von drei definierten Szenarien eine ökonomische und technische Bewertung der Auswirkungen auf die Anlagen und Strukturen statt.

## 8. Ergebnisse der Prognosesimulationen

### 8.1 Wahrscheinlichkeitsbereich der Mengengebührenentwicklung aus der Monte-Carlo-Simulation

Zur Darstellung des möglichen Intervalls der Gebührenentwicklung, welche sich durch die Variation der Rahmenparameter innerhalb ihrer Spannweiten ergibt, wurde eine MCS durchgeführt. Die aus der MCS resultierende Mengengebührenentwicklung ist in Abbildung 8-1 abgebildet.

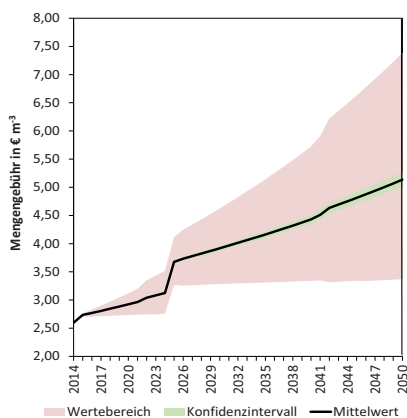


**Abbildung 8-1:** Anhand der MCS resultierende Mengengebührenentwicklung bis 2050 bei Überlagerung der maximalen Rahmenparameterausprägungen

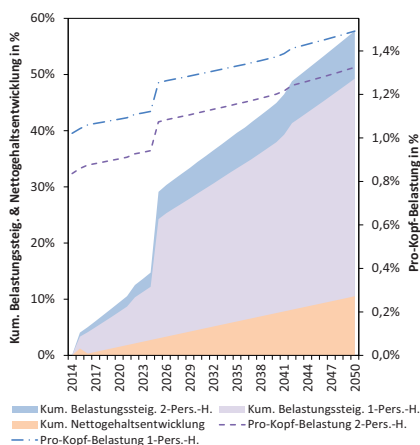
Die Ergebnisse der Mengengebührenentwicklung aus den 13.068 Variationsberechnungen sind in drei Bereiche zu unterteilen. Der nicht simulierte Bereich enthält die Mengengebührenentwicklung in den Wertebereichen der Rahmenparameter, welche hinsichtlich der Häufigkeitsverteilung der einzelnen Rahmenparameter in der Kombination nicht vorkam und somit nicht simuliert wurde. Um diesen Bereich grafisch umreißen zu können wurde ein separater Simulationsdurchlauf mit den pessimistischsten Maximalwerten der Rahmenparameterrange (Bevölkerungsveränderung -50 %, Inflation 6 %, Zinsen 11 %, Wasserverbrauchsveränderung -10 %) durchgeführt. Bezogen auf die Rahmenbedingungen in diesem Bereich sind die enthaltenen Mengengebühren als unrealistisch einzuordnen. Der simulierte Bereich enthält die Werte, welche sich aus den Kombinationen der normalverteilten Rahmenparameter ergeben. Insgesamt resultieren 1.369 normalverteilte Kombinationen von den möglichen 13.068. In diesem Bereich sind die Maximalwerte ebenfalls vertreten, doch sind diese nicht gemeinsam in einer Kombination aufzufinden. Das Eintreffen dieser Maximalwerte und die daraus resultierenden Mengengebühren oberhalb des 90 %-Quantils sind allerdings als unwahrscheinlich anzusehen. Der dritte Bereich ist Teilmenge des simulierten Bereichs

und enthält das 90 %-Quantil aller simulierten Mengengebühren. Für das Jahr 2050 beträgt die Spanne von  $3,19 \text{ € m}^{-3}$  bis  $12,69 \text{ € m}^{-3}$ . Der arithmetische Mittelwert über alle simulierten Werte beträgt  $8,47 \text{ € m}^{-3}$ .

Für eine exaktere Bestimmung der wahrscheinlich zu erwartenden Mengengebührenentwicklung erfolgte eine zweite MCS mit verkleinerten Rahmenparameterspannweiten. Die Restriktion erfolgte zur Approximation der Spannweiten an die Erwartungswerte. Durch die Verkleinerung der Spannweiten verkleinert sich ebenso der Wahrscheinlichkeitsbereich wodurch die Ergebnisse an Aussagekraft gewinnen. Aus den restringierten Rahmenparameterspannweiten in Tabelle 4-13 resultieren die in Abbildung 8-2 dargestellten jährlichen Mengengebühren aus der MCS und die damit verbundenen PKB der Haushalte in Abbildung 8-3.



**Abbildung 8-2:** Mengengebührenentwicklung bei restringierter Rahmenparametereinstellung



**Abbildung 8-3:** Resultierende Haushaltsbelastungen aus der Mengengebührenentwicklung

Mit größerem Prognosehorizont weitet sich der Wertebereich der simulierten Mengengebühren aus (Abbildung 8-2). Für das Jahr 2050 liegt der Bereich der simulierten Mengengebühr von  $3,37 \text{ € m}^{-3}$  bis  $7,38 \text{ € m}^{-3}$ . Bei dieser Betrachtung wurden, aufgrund der geringen Anzahl an möglichen Parameterkombinationen ( $n=240$ ), statt der normalverteilten Häufigkeiten der einzelnen Parameterwerte in den MCS-Durchläufen, alle möglichen Kombinationen mittels Permutationsvariationen simuliert. Aus der Ergebnismatrix der Mengengebührenentwicklung resultieren die unteren und oberen Konfidenzen für 2050 von  $5,13 \text{ € m}^{-3}$  und  $5,26 \text{ € m}^{-3}$ . Im Zuge des Berechnungsverfahrens der Konfidenzintervalle kann geschlussfolgert werden, dass im Rahmen aller Variationsmöglichkeiten innerhalb der Parameterspannweiten, mit 90 %iger Wahrscheinlichkeit die Mengengebühr sich innerhalb des Konfidenzintervalls befindet. Der aus den berechneten Werten gebildete Mittelwert der Mengengebührenentwicklung beträgt  $5,13 \text{ € m}^{-3}$  in 2050. Ausgehend von der Mengengebühr in 2014 würde dies eine Gebührenerhöhung von 97,3 % bedeuten.



Mittels der Mengen- und Grundgebühr wurde mit einem durchschnittlichen Wasserverbrauch von  $120 \text{ l E}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (abgeleitet vom Mittelwert für Deutschland mit  $121 \text{ l E}^{-1} \text{ d}^{-1}$  aus Daten von 2007, 2010 und 2013 des StatBA 2013) die PKB der Haushalte ermittelt. Diesbezüglich ist in Abbildung 8-3 die Entwicklung der PKB der Haushalte (SH und ZPH) in Form der jährlichen relativen Steigerung sowie als relative PKB zu entnehmen. Nach OECD (2003) ist die relative Haushaltsbelastung ein Gradmaß zur Abschätzung der zumutbaren Kosten durch die Wasserver- und Abwasserentsorgung für einen Haushalt. In der Regel übersteigen diese Kosten nicht 1,5 % des zur Verfügung stehenden Einkommens. Übersteigen diese Ausgaben 3 % bis 5 % des Nettoeinkommens werden diese von der OECD als sehr hoch bis unzumutbar angesehen. Die United States Environmental Protection Agency (US EPA) hingegen empfiehlt, dass die Belastung der Haushalte 2,5 % des mittleren Nettohaushaltseinkommens nicht überschreiten sollte. Nach Meinung der internationalen Finanzinstitutionen (IFIs), der Weltbank (IBRD) und der Europäischen Bank für Wiederaufbau und Entwicklung (EBRD) sollten die Belastungen 4 % nicht übersteigen. Es wird ersichtlich, dass unterschiedliche Auffassungen über die Zumutbarkeit existieren, jedoch ist nach Region und dem zur Verfügung stehenden Einkommen zu differenzieren (OECD 2003). Hinsichtlich der Bedeutung der Einkommensentwicklung zur Ermittlung der relativen PKB ist die relative durchschnittliche Einkommensentwicklung in M-V vergleichend in Abbildung 8-3 mit dargestellt.

Die relativen PKB eines ZPH und eines Single-Haushaltes (SH) im Gebiet des betrachteten Aufgabenträgers betrugen 0,8 % und 1,0 % in 2014. Basierend auf den mittleren Mengengebühren der MCS lässt sich eine relative Belastung durch die Schmutzwasserentsorgung (SWE) in 2050 von 1,3 % (ZPH) und 1,5 % (SH) ableiten. Zur Projektion auf die OECD Einstufungen sind die Kosten der Trinkwasserversorgung als auch der Niederschlagswasserbeseitigung zu ergänzen. Für die Berechnung der Gesamtbelastung durch die SWW wurde anhand der kumulierten Gemeindedaten des StatA M-V (2016a) der einwohnerspezifische Wert für Wohngebäudeflächen mit  $67 \text{ m}^2 \text{ E}^{-1}$  als Bezugsgröße für die versiegelte Fläche zur Ermittlung der jährlichen Niederschlagswasserkosten pro Kopf hergeleitet. Mit einer Niederschlagswassergebühr von  $0,54 \text{ € m}^{-2}$  beträgt die PKB  $36,18 \text{ € a}^{-1}$ . Aus der Summe der PKB durch die SWE und durch die Niederschlagswasserbeseitigung ergibt sich der Betrag für die Abwasserwirtschaft (AWW). Die Bestimmung des Haushaltsbelastungsanteils durch die Trinkwasserversorgung wurde in Relation zur Belastung durch die AWW mit 40,8 % aus der Untersuchung von Gießler und Tränckner (2014) hergeleitet. In der Studie von ZUSIE (2013) zur Bestimmung der Effekte des demografischen Wandels auf die Siedlungswasserwirtschaft (SWW) in Brandenburg, beträgt der durch die Trinkwasserversorgung verursachte Belastungsanteil der Haushalte vergleichsweise 38,6 %. In Deutschland beträgt dieser Anteil durchschnittlich 44,8 %. In Zusammenhang mit der Belastung durch die Regenwasserentsorgung (RWE) und die Trinkwasserversorgung (TWV) kann basierend auf den simulierten Haushaltsbelastungen durch die SWE die Gesamtbelastung durch die SWW abgeleitet werden. Die Haushaltsbelastung durch die SWE steigt, gemäß den Simulationsergebnissen bis 2050, um 49,3 % (SH) und 57,8 % (ZPH) und beläuft sich auf  $290 \text{ € a}^{-1}$  bzw.  $257 \text{ € a}^{-1}$ . Ausgehend von einer Nettoeinkommensentwicklung von 10,5 % bis 2050 in M-V (siehe Prädiktion der Nettoeinkommensentwicklung in Anhang 4) erhöht sich die PKB von 1,0 % auf 1,5 % (SH) und von 0,8 % auf 1,3 % (ZPH). Bezogen auf die SWW beträgt die PKB 2,6 % (ZPH) und 2,8 % (SH). Gemäß OECD sind diese Belastungen

als noch vertretbar anzusehen ( $< 3 \%$ ), nach US EPA liegen die jährlichen Kosten mit  $0,1 \%$  bzw.  $0,3 \%$  über dem Grenzwert.

## 8.2 Detaillierte Parameteranalyse basierend auf Szenario-Simulationen

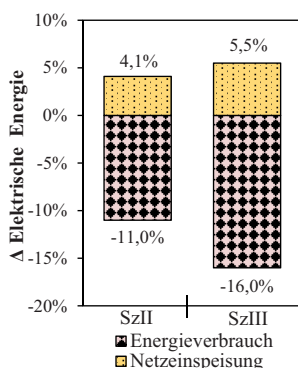
Zur detaillierten Analyse der technischen und wirtschaftlichen Parameter wurden anhand der statistischen Auswertung der Rahmenparameter drei Szenarien konzipiert. Die Rahmenbedingungen der einzelnen Szenarien sind in Tabelle 4-14 beschrieben. Basierend auf den Annahmen für die Rahmenbedingungen resultieren folgende Werte der, in Tabelle 8-1 enthaltenen technischen Parameter, welche für die weitere Betrachtung und zur Herleitung der Kosten relevant sind.

**Tabelle 8-1:** Ergebnisse von prozessbasierten Parametern aus der Szenarienbetrachtung

Parameter	Einheit	Sz I	Sz II	Sz III
Schmutzwassermenge	( $\text{m}^3 \text{ a}^{-1}$ )	88.615	-169.383	-339.203
	(%)	5,4	-10,3	-20,6
Fällmittel	( $\text{kg a}^{-1}$ )	-95	-1.351	-1.998
	(%)	-0,7	-9,6	-14,2
Schlammmenge	( $\text{Mg Ts a}^{-1}$ )	0	-149,9	-231,8
	(%)	0,0	-6,4	-9,9
Energieverbrauch KA	( $\text{MW a}^{-1}$ )	0	-243,0	-354,2
	(%)	0,0	-11,2	-16,4
Energieerzeugung	( $\text{MW a}^{-1}$ )	-5	-136,1	-209,4
	(%)	0,0	-3,1	-4,8
Eigenenergieverbrauch	( $\text{MW a}^{-1}$ )	1	-229,7	-335,3
	(%)	0,0	-11,0	-16,0
Netzeinspeisung	( $\text{MW a}^{-1}$ )	-5	93,6	125,9
	(%)	0,0	4,1	5,5

In Sz I würde hinsichtlich der Annahmen die Schmutzwassermenge um  $88.615 \text{ m}^3$  ( $5,4 \%$ ) bis 2050 steigen. Aufgrund des *Bevölkerungsrückgangs* und des sinkenden *Wasserverbrauchs* (nur in Sz III) in den anderen beiden Szenarien würde sich die Schmutzwassermenge um  $169.383 \text{ m}^3$  ( $-10,3 \%$ ) bis  $339.203 \text{ m}^3$  ( $-20,6 \%$ ) im gleichen Zeitraum verringern. Obwohl in Sz I die Schmutzwassermenge zunimmt, bleiben die Stofffrachten gleich. Bezogen auf die Konzentrationen kommt es zur Verdünnung. Für die chemische Phosphorelimination bedeutet dies für Sz I, dass dadurch weniger *Fällmittel* benötigt werden um die Zielkonzentration zu erreichen und deshalb der jährliche *Fällmittelverbrauch* um  $95 \text{ kg Fe a}^{-1}$  ( $-0,7 \%$ ) sinkt. In Sz II führt der *Bevölkerungsrückgang* zu einer Senkung des *Fällmittelverbrauchs* von  $1,3 \text{ Mg Fe a}^{-1}$  ( $-9,6 \%$ ). Der *Fällmittelreduktion* durch den verstärkten *Bevölkerungsrückgang* in Sz III wirkt der höhere *Fällmittelbedarf* durch die stoffliche Aufkonzentration geringfügig entgegen und bewirkt eine Reduktion von ca.  $2,0 \text{ Mg Fe a}^{-1}$  ( $-14,2 \%$ ). Durch die gleichbleibende Fracht in Sz I bleibt die *Schlammmenge* bezogen auf die TS unverändert. Eine Reduktion der *Schlammmenge* um  $149,9 \text{ Mg TS a}^{-1}$  resultiert in Sz II und um  $231,8 \text{ Mg TS a}^{-1}$  in Sz III. Durch eine Verringerung der *Schlammengen* würde sich auch die *Erzeugung von elektrischer Energie* aus der Klärschlammfaulung reduzieren. Dem steht ein geringerer elektrischer Energiebedarf bei der Abwasserbehandlung gegenüber. Hinsichtlich der vernachlässigbaren marginalen Veränderung in der Energiebilanz in Sz I sind in Abbildung 8-4 die Energiebilanzen von KA 12 für Sz II und Sz III abgebildet.

## 8. Ergebnisse der Prognosesimulationen



**Abbildung 8-4:** Energiebilanz von KA 12 für Sz II und Sz III

Ein *Bevölkerungsrückgang* von 20 %, wie in Sz II angenommen, würde sich auf die *elektrische Energieerzeugung* von KA 12 mit einer Minderung von  $136,1 \text{ MWh a}^{-1}$  (-3,1 %) auswirken. Der *Energiebedarf* für die Abwasserbehandlung würde sich um  $229,7 \text{ MWh a}^{-1}$  (-11,0 %) reduzieren. Im Zuge der größeren Reduktion des Eigenenergiebedarfsanteils im Vergleich zur Verringerung der *Energieerzeugung* würde ein Energieüberschuss von  $93,6 \text{ MWh a}^{-1}$  resultieren. Damit würde sich die Netzeinspeisung um 4,1 % erhöhen. Unter den Rahmenbedingungen von Sz III mit einer *Bevölkerungsminderung* von 30 % und einer Reduktion der häuslichen Wasserverbrauchsmenge von 11 %, würde die *Energieerzeugung* um  $209,4 \text{ MWh a}^{-1}$  (-4,8 %) und der Eigenenergiebedarf um  $335,2 \text{ MWh a}^{-1}$  (-16 %) sinken. Es bliebe ein Überschuss von  $125,9 \text{ MWh a}^{-1}$  (5,5 %), welcher zusätzlich ins Versorgungsnetz eingespeist würde.

Die aus den technischen Parametern hergeleiteten Kosten sind in Tabelle 8-2 den entsprechenden Kostenarten zugeordnet und deren absolute und relative Veränderungen in den einzelnen Szenarien aufgeführt.

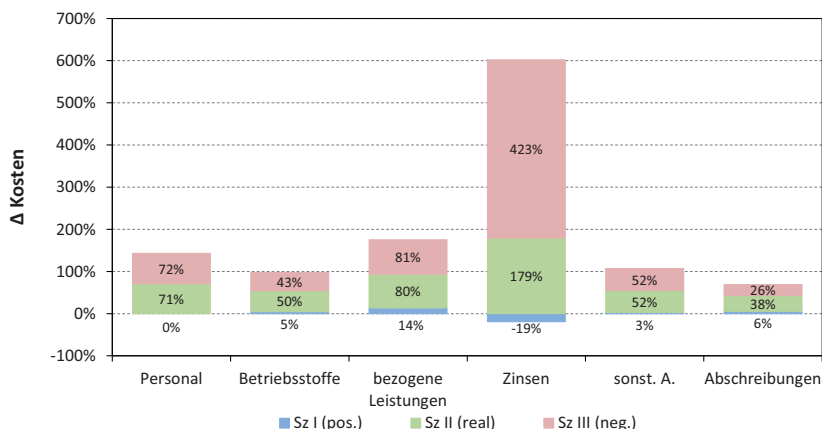
**Tabelle 8-2:** Detaillierte Auflistung der absoluten Veränderungen bei den Kostenarten in den Szenarien zum Ende des Prognosezeitraums

Kostenart	Einheit	Positivszenario (Sz I)	Realszenario (Sz II)	Negativszenario (Sz III)
Δ Personal	(T€ a <sup>-1</sup> )	0	938	1.895
Δ Betriebsstoffe	(T€ a <sup>-1</sup> )	21	240	429
davon elektr. Energie	(T€ a <sup>-1</sup> )	1	15	27
davon Fällmittel	(T€ a <sup>-1</sup> )	-0,3	27	56
Δ Bezogene Leistungen	(T€ a <sup>-1</sup> )	175	1.204	2.249
davon Schlamm Entsorgung	(T€ a <sup>-1</sup> )	167	404	646
davon Kanalreparatur	(T€ a <sup>-1</sup> )	7	21	34
davon Kanalreinigung	(T€ a <sup>-1</sup> )	-0,5	8	17
Δ Zinsen	(T€ a <sup>-1</sup> )	-128	1.089	3.957
Δ Sonstige Aufwendungen	(T€ a <sup>-1</sup> )	6	412	1.195
Δ Abschreibungen	(T€ a <sup>-1</sup> )	74	994	2.065

In Abhängigkeit von der Personalkostensteigerungsrate variieren die *Personalkostenveränderungen* in 2050 von 0 T€ a<sup>-1</sup> bis 1.895 T€ a<sup>-1</sup>. Die Kosten für *Betriebsstoffe* erhöhen sich von 21 T€ a<sup>-1</sup> bis 429 T€ a<sup>-1</sup>. Darin enthalten sind 1 T€ a<sup>-1</sup> bis 27 T€ a<sup>-1</sup> für die *elektrischen Energieverbräuche* der KA und für die Kanalnetzbewirtschaftung sowie 0,35 T€ a<sup>-1</sup> bis 56 T€ a<sup>-1</sup> für die *Fällmittel*. Bezogen auf den *Bevölkerungsrückgang* von Sz I bis Sz III verringert sich zwar der *Energieverbrauch* für beide Bereiche bzw. der *Fällmittelverbrauch*, durch die Preissteigerung erhöhen sich jedoch die Ausgaben. Bei den *bezogenen Leistungen* führt die *Inflation* zu einer Kostensteigerung von 175 T€ a<sup>-1</sup> bis 2.249 T€ a<sup>-1</sup>. In den Kosten inkludiert ist die vom Aufgabenträger angegebene Änderung der *Schlamm Entsorgung* innerhalb des Betrachtungszeitraums, von einer landwirtschaftlichen Verwertung hin zur thermischen Verbrennung der gesamten *Schlammmenge*. Dies führt zu einer Verdopplung der Schlamm Entsorgungskosten in Sz I. Durch die zusätzliche Verteuerung in den anderen beiden Szenarien, würden sich die Kosten bis 2050 von 167 T€ a<sup>-1</sup> bis 646 T€ a<sup>-1</sup> erhöhen. Aufgrund der über die Szenarien gleichbleibenden Kanalsanierungsquote von 1,5 % verändern sich auch nicht die reparaturbedürftigen Kanallängen. Die Kostensteigerung ist ausschließlich durch die Teuerung bedingt und beträgt 7 T€ a<sup>-1</sup> bis 34 T€ a<sup>-1</sup>. Bei den Kanalreinigungskosten würde es in Sz I durch die Zunahme der Schmutzwassermengen und der damit verbundenen Reduktion von Ablagerungen in den Leitungen, zu einer Minderung der Aufwände von 0,5 T€ a<sup>-1</sup> kommen. Im Zuge der Verringerung der Schmutzwassermengen in Sz II und Sz III führt dies zu einer Kostensteigerung von 8 T€ a<sup>-1</sup> bzw. 17 T€ a<sup>-1</sup>. In Folge einer sich eventuell weiter verschlechternden Finanzpolitik, könnten die *Kreditzinssätze*, wie in Sz I angenommen, gegen Null tendieren. Über den Prognosezeitraum würden für die neu aufgenommenen Verbindlichkeiten bei den Kreditinstituten zur Reinvestition der Sachanlagen keine *Zinsaufwände* entstehen. Somit würde sich bis 2050 der jährliche Aufwand um 128 T€ a<sup>-1</sup> reduzieren. Bei einer Erhöhung der *Kreditzinsrate* auf 2 % (Sz II) bzw. 4 % (Sz III) käme es zu einem Anstieg der *Zinsaufwände* von 1.089 T€ a<sup>-1</sup> bzw. 3.957 T€ a<sup>-1</sup>. Unabhängig vom Szenario steigen bei den *sonstigen Aufwendungen* die Kosten. Moderat erfolgt diese Steigerung in Sz I mit 6 T€ a<sup>-1</sup>; mit Verschlechterung der Rahmenbedingungen wächst sie proportional in Sz II mit 412 T€ a<sup>-1</sup> und in Sz III mit 1.195 T€ a<sup>-1</sup>. *Abschreibungen* werden durch die Sachanlagenpreise der Reinvestition geprägt, welche wiederum in Abhängigkeit zur *Inflation* stehen. Auch ohne vorliegende *Inflation* (Sz I) würden die *Abschreibungen* durch größere Abwassermengen und der dadurch bedingten Erweiterung bzw. Vergrößerung von Anlagen und Systemen steigen. Basierend auf den Annahmen von Sz I würde eine Erhöhung von 74 T€ a<sup>-1</sup> in dieser Kostenart erfolgen. Im Gegenzug würde es, trotz *Bevölkerungsrückgangs* und zusätzlicher Verringerung der häuslichen *Wasserverbrauchsmenge*, durch höhere *Inflationsraten* zu einer gravierenden Erhöhung im Bereich der *Abschreibungen* kommen. In Sz II mit einer *Inflationsrate* von 1,5 % würden die *Abschreibungen* um 994 T€ a<sup>-1</sup> und in Sz III mit einer *Inflationsrate* von 2,5 % um 2.065 T€ a<sup>-1</sup> steigen. Die aus den Kostenarten resultierende Gesamtkostenentwicklung beträgt für Sz I 183 T€ a<sup>-1</sup>, für Sz II 4.504 T€ a<sup>-1</sup> und für Sz III 10.264 T€ a<sup>-1</sup>.

## 8. Ergebnisse der Prognosesimulationen

Eine Gesamtübersicht der relativen Veränderungen in den einzelnen Szenarien für die Kostenarten ist in Abbildung 8-5 präsentiert.

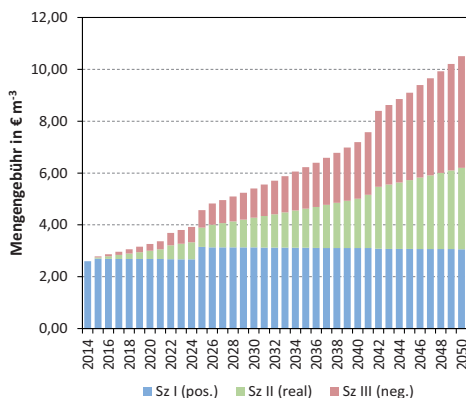


**Abbildung 8-5:** Relative Veränderung der Kostenarten zum Ende des Prognosezeitraums

Die Steigerung der *Personalkosten* beträgt in Abhängigkeit der Preissteigerungsrate in den Szenarien von 0 bis 143 %. Bei den *Betriebsstoffen* steigen die Kosten von 5 % bis 98 %. Auch in Sz I kommt es bei den *bezogenen Leistungen* zu einer Erhöhung der Aufwände von 14 %. Maximal ergäbe sich bei dieser Kostenart eine Erhöhung von 175 %. Durch die zusätzlichen Verbindlichkeiten für die Reinvestition von zuvor geförderten Sachanlagen resultiert die größte relative als auch absolute Kostensteigerung bei den *Zinsaufwänden*. Für den Fall, dass die Kreditzinsraten gleich bzw. nahe null Prozent sind, würde sich eine Reduktion bei den *Zinsaufwänden* von 19 % ergeben. Mit einer Verbesserung der wirtschaftlichen Lage in der Europäischen Union käme es jedoch wieder zu einer Erhöhung der *Kreditzinssätze*. Ein *Kreditzinssatz* von 4 % (Sz III) würde zu einer Steigerung der *Zinsaufwände* von 602 % führen. Bei den *sonstigen Aufwänden* beträgt die in den Szenarien ermittelte Spannweite der Kostenerhöhung von 3 % bis 107 % und die der *Abschreibungen* von 6 % bis 70 %. Insgesamt schwanken die Gesamtkosten von Sz I mit 3 % bis Sz III mit 171 %.

Die Mengengebührenentwicklung des exemplarischen Aufgabenträgers, welche aus den Gesamtkosten und in Relation zu den Schmutzwassermengen hergeleitet wurde, ist für die einzelnen Szenarien in Abbildung 8-6 aufgeführt.

## 8. Ergebnisse der Prognosesimulationen



**Abbildung 8-6:** Jährliche Mengengebührentwicklung basierend auf den Rahmenbedingungen der Szenarien

Bezogen auf die Annahmen in Sz I würde die Mengengebühr bis 2050, außer dem Sprung in 2025 relativ konstant bleiben. Am Ende des Betrachtungszeitraumes beträgt die Gebühr  $3,06 \text{ € m}^{-3}$ . Dies entspricht einer Gebührenerhöhung um 17,9 %. Daraus ergibt sich in Zusammenhang mit der Grundgebühr eine Haushaltsbelastung durch die SWE in 2050 von  $167 \text{ € a}^{-1}$  (ZPH) und  $199 \text{ € a}^{-1}$  (SH). Für die SWW würde demzufolge eine PKB von  $343 \text{ € a}^{-1}$  (ZPH) bzw.  $373 \text{ € a}^{-1}$  (SH) resultieren. Über den gesamten Prognosezeitraum beträgt die maximale relative PKB je nach Haushaltstyp 1,9 % bzw. 2,2 %. Durch die kontinuierliche Gehaltssteigerung und ab 2025 geringfügig sinkende Mengengebühren, würde dies zu einer relativen PKB in 2050 von 1,8 % (ZPH) und 1,9 % (SH) führen. Mit diesen Belastungen wäre der Grenzwert von 2,5 % der maximalen Netto-Haushaltsbelastung gemäß der US EPA eingehalten. Basierend auf den Annahmen in Sz II würde sich bis 2050 die Mengengebühr um 139 % auf  $6,20 \text{ € m}^{-3}$  erhöhen. Die PKB durch die SWE würde sich demnach auf  $304 \text{ € a}^{-1}$  (ZPH) und  $337 \text{ € a}^{-1}$  (SH) belaufen. Damit ergäbe sich zum Ende des Betrachtungszeitraumes für Sz II eine absolute PKB durch die SWW von  $576 \text{ € a}^{-1}$  (ZPH) bzw.  $605 \text{ € a}^{-1}$  (SH) und damit eine relative Belastung von 3,0 % bzw. 3,1 %. Bereits 2025 wäre der Richtwert der US EPA für einen SH erreicht. Für einen ZPH würde dies erst für 2039 zutreffen. Die Angemessenheit der Entgeltbelastung wäre gemäß den Richtwerten der OECD für einen SH ab 2043 kritisch zu betrachten. ZPH blieben stets unter dem 3 % Richtwert. Mit den noch ungünstigeren Rahmenbedingungen gemäß Sz III, würde sich die Mengengebühr mit einer Steigerung von 304 % mehr als verdreifachen. Für ZPH würde die Entgeltbelastung durch die SWE  $493 \text{ € a}^{-1}$  und für SH  $525 \text{ € a}^{-1}$  betragen. Mit Blick auf die hergeleitete Entgeltbelastung durch die SWW von  $895 \text{ € a}^{-1}$  (ZPH) und  $924 \text{ € a}^{-1}$  (SH) resultiert für 2050, hinsichtlich der im Verhältnis zu den Kosten zu geringen Gehaltsentwicklung, eine relative Belastung von 4,6 % (ZPH) bzw. 4,8 % (SH). Solche Belastungen wären nach OECD und IFIs als unangemessen einzustufen. Bereits ab 2024 wären für SH die Nettobelastungen bei 2,5 %. Zwei Jahre später wäre dies auch für ZPH der Fall. Der kritische Richtwert der OECD (3%) wäre für SH 2029 und für ZPH 2035 erreicht. In 2042 für SH und 2045 für ZPH würde der IFIs Richtwert überschritten werden.

### 8.3 Ergebnisvergleich zu analogen nationalen und regionalen Prognosen

In der Trendbetrachtung „Sinkende Bevölkerungszahl“ des auf dem deutschlandweiten Benchmarking-Daten beruhenden Prognosemodells eines Standardunternehmens der Abwasserwirtschaft von Tränckner et al. (2013), beträgt die prognostizierte Steigerung der PKB durch die AWW, bei einer *Bevölkerungsverringerung* von 40 % über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren (2010 bis 2040) ca. 51 %. Bei der von ZUSIE (2013) durchgeführten Analyse im Untersuchungsgebiet Brandenburg wird bei einem *Bevölkerungsrückgang* von 32 % innerhalb des Betrachtungszeitraums von 29 Jahren (2011 bis 2030), eine Erhöhung durch die SWW der PKB eines ZPH von 23,4 % erfolgen. Mit einem vereinfachten Berechnungsmodell (Kostenmodell in Microsoft Excel) ermittelte Birkholz (2009) für sieben kleine ländliche Ortschaften (10 - 1.151 E, arithmetischer Mittelwert 207 E) in M-V, bei einem *Kreditzinssatz* von 4 % und einer *Bevölkerungsreduktion* von im Mittel 11 % bei einer Spanne von 5 % bis -50 % (berechnet für die Ortschaften), eine Steigerung der PKB durch die AWW von -5 % bis 40 %. Für die SWW beträgt unter diesen Rahmenbedingungen die gemittelte Steigerung der PKB von 9 % bis 12,5 %. Im Zuge einer zusätzlichen altersbedingten Abnahme des häuslichen *Wasserverbrauchs* von -15 % steigt die Haushaltsbelastung durch die AWW von 16 % bis 34 %. Betrachtet auf die gesamte SWW resultiert für diese Ortschaften eine Erhöhung von 29 % bis 43,5 %. Basierend auf einem aus regionalen ökonomischen und infrastrukturellen Datenbeständen bestehenden stationären Prognosemodell berechneten Gießler und Tränckner (2014) anhand definierter Rahmenbedingungen (inflationsbereinigte Kostenberechnung, *Kreditzinssatz* 5 %), für einen *Bevölkerungsrückgang* von 18,5 % eine gemittelte Erhöhung der PKB durch die AWW eines ZPH in M-V bis 2030 von 8,2 %. Für die SWW wurde ein Anstieg der Belastung von 6,2 % kalkuliert. Durch eine weitere Minderung der *Bevölkerung* von 7,7 % würde bis 2050 ein weiterer gemittelter Anstieg der Haushaltsbelastung durch die AWW von 70,3 % und für die SWW von 63,2 % resultieren. In Anlehnung an eine analoge Untersuchung von Hoffmann (2016) mit einem ähnlichen Ansatz im selben Untersuchungsgebiet, würde unter den definierten Rahmenbedingungen eines Best-Case-Szenarios (*Inflationsrate* 0,5 %, *Kreditzinssatz* 1,5 %) und eines landkreisbezogenen *Bevölkerungsentwicklung* von -11 % und 16 %, eine gemittelte Erhöhung der PKB eines ZPH durch die AWW von 1,5 % und beim Average-Case-Szenario (*Inflationsrate* 1,5 %, *Kreditzinssatz* 3,0 %) mit einem *Bevölkerungsrückgang* von 3 % bis 25 % würde eine Erhöhung von 17,1 % erfolgen. Die Gesamtbelastung durch die SWW wurde mit 5,1 % für das Best-Case-Szenario und 22,9 % für das Average-Case-Szenario angegeben. Bezogen auf die Berücksichtigung der Implementierung einer 4. Reinigungsstufe zur Elimination von Mikroschadstoffen bei Anlagen der GK 5 ist das Worst-Case-Szenario für einen Vergleich ungeeignet. Im zweiten Zeithorizont unter Fortführung der Prognose bis 2060 und einer *Bevölkerungsentwicklung* von -15 % bis 10 % im Best-Case-Szenario führt dies zu einer Erhöhung der PKB durch die AWW von 44,8 % und durch die SWW von 48,9 %. Beim Average-Case-Szenario mit einem *Bevölkerungsrückgang* von -5 % bis -26 % beträgt die Steigerung bis 2060 216,6 % (AWW) und 222,3 % (SWW).

Die Steigerungen der PKB aus den dargestellten Untersuchungen variieren bezogen auf die AWW von -5 % bis 216 % und bezogen auf die SWW von 5,1 % bis 222,3 %. In keiner der genannten Prognosen fand eine separate Darstellung der Haushaltsbelastung durch die SWE statt. Hinsichtlich der unterschiedlichen Berechnungsverfahren, Rahmenbedingungen, Abstrahierung und betrachteten

Aspekte, ist ein Vergleich nur bedingt möglich. Der folgende Vergleich dient der Darstellung des möglichen Entwicklungsspektrums der PKB zur Einschätzung der vorliegenden Ergebnisse.

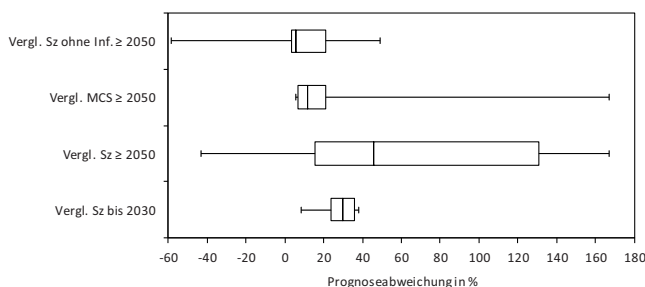
Die Abweichung anhand der MCS simulierten PKB durch die SWE der vorliegenden Untersuchung zu den abgeleiteten PKB durch die AWW von Tränckner et al. (2013) beträgt 6,8 %. Aufgrund der inflationsbereinigten Betrachtung und der geringen mittleren *Inflation* von 0,75 % der MCS, fällt im Gegensatz zu den Szenarien die Abweichung gering aus. Bei den Ergebnissen aus den Szenarien betragen die Abweichungen 57,2 % (Sz II) und 186,7 % (Sz III). Durch die Berücksichtigung der zusätzlichen Kosten der RWE erhöht sich die Abweichung bei der MCS auf 9,6 %, aber verringert sich bei den Szenarien auf 31,8 % (Sz II) und 98,9 % (Sz III). Mit Bereinigung von inflationären Einflüssen betragen die Abweichungen -17,4 % (MCS), -19,2 % (Sz II) und 47,9 % (Sz III). Bezogen auf die *Bevölkerungsreduktion* lassen sich die Ergebnisse von Sz III mit denen der Studie von Tränckner et al. (2013) am ehesten vergleichen. Obwohl in der vorliegenden Untersuchung eine geringere Reduktion der *Bevölkerung* angenommen wird, resultiert jedoch bei Außerachtlassung der inflationsbedingten Einflüsse eine höhere Steigerung der Belastung. Dieser Unterschied kann in der infrastrukturellen Charakteristik des betrachteten Aufgabenträgers im Vergleich zum „Standard Abwasserunternehmen“ begründet sein. Zwischen der mittleren PKB durch die SWE aus der MCS und der berechneten PKB durch die SWW von ZUSIE (2013) fällt, bezogen auf das gleiche Jahr (2030) und den gleichen Haushaltstyp (ZPH), die Steigerung der PKB um 11,0 % höher aus. Mit der Herleitung der PKB durch die SWW für die MCS beträgt die relative Abweichung zur ermittelten PKB der ZUSIE-Studie nur 3,5 %. Auch in dieser Studie fand eine inflationsbereinigte Betrachtung statt, weshalb größere Abweichungen zu den Szenarien mit 56,2 % (Sz II) und 155,6 % (Sz III) vorliegen. Von der *Bevölkerungsentwicklung* trifft Szenario III hier am ehesten zu. Abzüglich der inflationsbedingten Kostensteigerung würde die relative Abweichung zwischen dem gemittelten Ergebnis der MCS und dem Ergebnis der ZUSIE-Studie nur 9,1 % betragen. Die ermittelten Spannweiten von Birkholz (2009) für die Steigerung der PKB durch die SWW in den Ortschaften, haben zu den PKB durch die SWW der MCS eine Abweichung von 11,5 % bis 26,0 %. Gießler und Tränckner (2014) bezogen sich auf denselben Prognosezeitraum mit ähnlicher *Bevölkerungsreduktion*. Auch in dieser Untersuchung erfolgte eine inflationsbereinigte Betrachtung. Im Vergleich zur PKB durch die SWW der MCS beträgt die Abweichung 20,8 % bis 2030 und 14,4 % bis 2050. Die Ergebnisse der PKB durch die SWW aus der Szenarienbetrachtung haben bis 2030 eine Abweichung von 28,6 % (Sz II) bis 55,0 % (Sz III) und bis 2050 von 10,2 % (Sz II) bis 109,6 % (Sz III). Mit Herausrechnung des geschätzten Inflationsanteils beträgt die Spanne bis 2030 von 4,6 % (Sz II) bis 15,0 % (Sz III) und bis 2050 von -43,8 % (Sz II) bis 19,6 % (Sz III). Im Vergleich zwischen der PKB durch die SWW der MCS und der PKB durch die SWW des Best-Case-Szenarios von Hoffmann (2016) liegt eine Abweichung von 4,1 % und zum Average-Case-Szenario von 21,9 % vor. Bis zum Prognoseende erhöht sich die Abweichung zum Best-Case-Szenario auf 6,1 % und beim Average-Case-Szenario resultiert eine Abweichung von -167,3 %. Zur Gegenüberstellung beider Prognosen werden hinsichtlich annähernd ähnlicher Rahmenbedingungen die Ergebnisse von Sz II mit dem Best-Case-Szenario und die Ergebnisse von Sz III mit dem Average-Case-Szenario miteinander verglichen. Bis 2030 ergibt sich ein Unterschied zwischen der PKB des SZ II und dem Best-Case-Szenario von 29,7 %. Zwischen Sz III und dem Average-Case-Szenario beträgt die Abweichung für dasselbe Jahr 38,3 %.



## 8. Ergebnisse der Prognosesimulationen

Am Ende der Prognosezeiträume beträgt der Unterschied der PKB zwischen Sz II und Best-Case-Szenario 30,7 % und zwischen Sz III und dem Average-Case-Szenario von -43 %. Bei Bereinigung der *Inflation* über den betrachteten Zeitraum, ergibt sich eine Abweichung zwischen Sz II und Best-Case-Szenario von 2,6 % und zwischen Sz III und Average-Case-Szenario von -58,3 %.

In Abbildung 8-7 wurden die Ergebnisse der genannten Studien dem Prognosezeitraum und der Prognosesimulationsart (MCS, Szenarien) der vorliegenden Untersuchung zugeordnet und die resultierenden Abweichungen dargestellt.



**Abbildung 8-7:** Gegenüberstellung der Prognoseergebnisse zu anderen nationalen und regionalen Studien

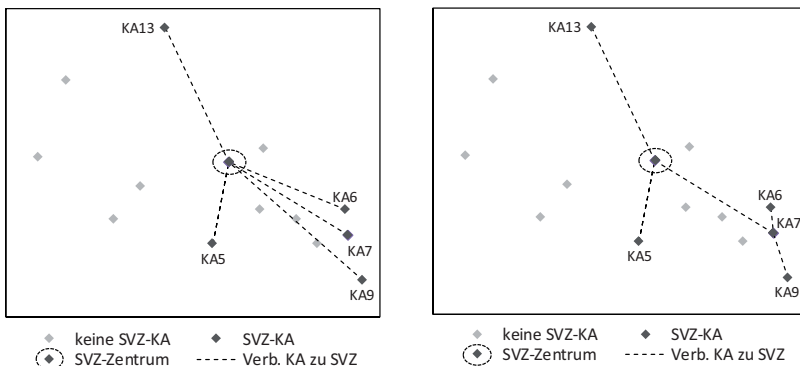
Die Mediane der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der aufgeführten Studien und der vorliegenden Untersuchung befinden sich in einer Spanne von 2,5 % (Sz ohne Inf.) bis 45,5 % (Sz ≥ 2050). Bei den Abweichungen der nach Rahmenbedingungen zugeordneten Szenarienergebnisse für den Zeitraum bis 2030 liegt nur eine geringe Spannweite von 4,1 % bis 38,3 % vor. Im Zuge der unterschiedlichen Herangehensweisen in der Berechnung und Rahmenparameterannahmen sind die Differenzen zwischen den prognostizierten Haushaltsbelastungen gering. Dies liegt unter anderem am kurzen Prognosezeitraum, denn aufgrund der geringen Anzahl an vorausgerechneten Jahren, ist die Wirkung der *Inflationsdifferenzen* der Prognoseannahmen geringer. Auch das Alter und der damit verbundene Investitionszeitpunkt der Systeme und Anlagen haben einen wesentlichen Einfluss, denn erst nach 2030 kommt es zu größeren Reinvestitionen. Aus diesem Grund kommt es zu größeren Abweichungen bis 2050/60. Durch den geringeren mittleren *Kreditzinssatz* und die mittlere *Inflationsrate* der MCS sind die Abweichungen zu den inflationsbereinigten Prognosen geringer, weshalb sich der Interquartilsabstand (Box, in welcher sich die mittleren 50 % der Abweichungen befinden) verkleinert. Mit Bereinigung der Prognoseresultate in Bezug auf inflationäre Einflüsse, liegen sämtliche Abweichungen der Prognose innerhalb eines engen Rahmens (Interquartilsabstand) von 2,2 % bis 19,6 %. Der Median liegt bei 4,7 %. Die Abweichungen vergrößern sich durch die *Inflationsbereinigung* zur Seite des 3. Quartilsabstandes auf -58,3 %. In Anbetracht der unterschiedlichen Organisations- und Infrastrukturen der Aufgabenträger in den Studien, belegt der Vergleich zur vorliegenden Untersuchung, dass unter dem Aspekt der *Bevölkerungsveränderung* und deren Effekte auf die Siedlungswasserwirtschaft bzw. die daraus resultierende Steigerung der Haushaltsbelastung, ähnliche Ergebnisse resultieren.

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

### 9.1 Schlammverwertungszentren

Da beim betrachteten Aufgabenträger bereits eine Schlammfäulung integriert ist, wurde für die demonstrative Anwendung der Anpassungsmaßnahme *SVZ* das Verbandsgebiet ohne den industriellen Indirekteinleiter mit dessen Schmutzwasseranteilen und der Annahme, dass noch keine Klärschlammfäulung mit energetischer Verwertung des Klärgases für die Kommunalabwasserbehandlung existiert, betrachtet. Hierfür wurden die Eingangsdaten des Modells den Annahmen angepasst. Mit dieser Betrachtung kann untersucht werden, ob eine Faulgasverwertung auch ohne den industriellen Indirekteinleiter tragbar wäre und welche finanziellen Auswirkungen dies hätte. Ohne die Abwässer des industriellen Indirekteinleiters würde sich anhand der Bevölkerungszahlen vom StatA M-V (2017) für die betreffende KA die GK 4 mit einer Ausbaugröße von 30.000 EW statt wie zuvor GK 5 (mit 200.000 EW) ergeben.

Basierend auf den Rechenalgorithmen des Moduls *SVZ* resultiert das in Abbildung 9-1 abgebildete Konzept mit den betreffenden KA.



**Abbildung 9-1:** SVZ-Konzept für den Aufgabenträger ohne industriellen Indirekteinleiter (links) mit zusätzlicher Optimierung der Schlammtransportwege (rechts)

Auch in dieser Betrachtung bleibt KA 12 die größte KA mit zentraler Lage im Verbandsgebiet, weshalb diese Anlage im Konzept das *SVZ* bleibt. Insgesamt besteht das *SVZ-Konzept* aus sechs Anlagen mit einer  $TS_{\text{org}}$ -Menge von  $14.993 \text{ kg TS a}^{-1}$ . Der Klärschlamm von KA 5, KA 6, KA 7, KA 9 und KA 13 wird durch LKW-Transporte zum *SVZ* gebracht. Wie bereits in Kap. 5.2 beschrieben, ist im Modell zur besseren Abschätzung der Transportkosten eine Optimierung der Transportwege (siehe Abbildung 9-1, rechts) optional durchführbar. Da die Transportkosten bereits in den bezogenen Leistungen enthalten sind, entfallen diese aus der Betrachtung. Dennoch soll an dieser Stelle der Unterschied zwischen den zwei Berechnungsansätzen erwähnt sein. Durch die Optimierung der Transportwege in der Modellbetrachtung verkürzt sich die Gesamtstrecke von 66,04 km auf 36,83 km.

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

Bei einem spezifischen Tonnenkilometerpreis von  $0,75 \text{ € m}^{-3} \text{ km}^{-1}$  (MKULNV 2014) würden sich demnach Transportkosten von  $13 \text{ T€ a}^{-1}$  statt  $25 \text{ T€ a}^{-1}$  ergeben. Obwohl nur eine grobgeschätzte Angabe der spezifischen Transportkosten von  $9 \text{ € m}^{-3}$  vom Aufgabenträger vorliegt, wird mit den optimierten Transportwegen eine gute Schätzung der Transportkosten mit einer Abweichung von 2,3 % erreicht.

Durch den Ausbau der Anlage ergeben sich für die jeweiligen Szenarien folgende in Tabelle 9-1 zusammengefassten Einsparungen und deren Entwicklungen über den Prognosezeitraum bis 2050.

**Tabelle 9-1:** Entwicklung der Energiebilanz innerhalb der Szenarien für KA 12 ohne Berücksichtigung des industriellen Indirekteinleiters im Rahmen der Anpassungsmaßnahme SVZ

Jahr	Sz	$E_{\text{el,KA,Verbr}}$ (MWh $\text{a}^{-1}$ )	$\Delta E_{\text{el,KA,Verbr}}$ (MWh $\text{a}^{-1}$ )	$\Delta K_{\text{En,el}}$ (T€ $\text{a}^{-1}$ )	$E_{\text{el,NE}}$ (MWh $\text{a}^{-1}$ )	$E_{\text{r,el,NE}}$ (T€ $\text{a}^{-1}$ )	$\Delta V_{\text{S,a}}$ (kg TS $\text{a}^{-1}$ )	$\Delta K_{\text{KSE}}$ (T€ $\text{a}^{-1}$ )
2015	I	0,445	-0,372	-57	0,856	207	-873	-24
2050	I	1,261	-0,372	-57	0,856	207	-873	-24
	II	0,977	-0,304	-80	0,646	156	-676	-32
	III	0,836	-0,275	-103	0,536	129	-578	-39

$\Delta$ : Differenzen bei den Parametern,  $E_{\text{el,KA,Verbr}}$ : Elektrischer Energieverbrauch KA,  $K_{\text{En,el}}$ : Elektr. Energiekosten,  $E_{\text{el,NE}}$ : Netzeinspeisung elektr. Energie,  $E_{\text{r,el,NE}}$ : Ertrag durch Netzeinspeisung von elektr. Energie,  $V_{\text{S,a}}$ : Jahresklärschlammmenge,  $K_{\text{KSE}}$ : Klärschlamm Entsorgungskosten

Die Umsetzung der Anpassungsmaßnahme erfolgt gemäß Modellalgorithmus im nachfolgenden Jahr des Prognosebeginns, dies entspricht in der Betrachtung dem Jahr 2015 (mit  $n=2$ ). Hinsichtlich der geringen Abweichungen im Jahr der Konzeptumsetzung sind in Tabelle 9-1 als Referenz ausschließlich die Einsparungen für Sz I für dieses Jahr enthalten. Denn je nach Szenario bestehen bereits zu diesem Zeitpunkt durch die unterschiedlichen Rahmenbedingungen unterschiedliche EW-Zahlen, Schmutzwassermengen und somit unterschiedliche Werte bei allen durch diese Größen beeinflussten Parameter. Durch die Erzeugung von 1,261 MWh an *elektrischer Energie* pro Jahr kann der *elektrische Energieverbrauch* der KA komplett durch Eigenversorgung gedeckt werden. Dies führt in 2015 zu einer Kosteneinsparung von  $57 \text{ T€ a}^{-1}$ . Obwohl sich in Sz II und Sz III die *Bevölkerungszahl* und damit der *Energiebedarf* der KA sowie die TS-Fracht verringert, erhöht sich aufgrund der *Inflation* der Preise bis 2050 das Einsparpotential bei den Energiekosten um ca.  $80 \text{ T€ a}^{-1}$  (Sz II) bzw.  $103 \text{ T€ a}^{-1}$  (Sz III) sowie bei den Schlamm Entsorgungskosten um  $32 \text{ T€ a}^{-1}$  (Sz II) bzw.  $39 \text{ T€ a}^{-1}$ .

Den Einsparungen stehen Mehrkosten in Form von *Abschreibungen* und *Zinsaufwänden* gegenüber. Die Investitionskosten für den Ausbau der energetischen Faulgasnutzung ermitteln sich aus den EW des SVZ sowie den fünf KA mit biologischem Reinigungsverfahren. Entsprechend der *Inflationsraten* der drei Prognoseszenarien sind in Tabelle 9-2 die resultierenden Investitionskosten eines Ausbaus zur energetischen Faulgasnutzung für 30.000 EW mit abgestuften Kostenanteilen, welche sich durch regional geringere Baukosten (z.B. durch geringe *Personalkosten*) ergeben, für das Jahr 2015 sowie die Verteuerung bis 2050, abgebildet.

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

**Tabelle 9-2:** Investitionskosten für den Ausbau zur energetischen Faulgasnutzung für KA 12 gestaffelt nach relativen Kostenanteilen für 2015 und 2050

K <sub>At</sub>	Inflation 0 %		Inflation 1,5 %		Inflation 2,5 %	
	2015 (Mio. €)	2050 (Mio. €)	2015 (Mio. €)	2050 (Mio. €)	2015 (Mio. €)	2050 (Mio. €)
100	2,360	2,360	2,431	3,908	2,479	5,499
90	2,124	2,124	2,188	3,517	2,232	4,949
80	1,888	1,888	1,945	3,126	1,984	4,399
70	1,652	1,652	1,702	2,735	1,736	3,849
60	1,416	1,416	1,459	2,345	1,488	3,300

K<sub>At</sub>: Kostenanteil

In den Investitionskosten sind die Material- und Herstellungskosten für den Faulbehälter, das BHKW sowie die zusätzlichen Anlagenteile (maschinelle Voreindickung, Zwischen-PWK, Schlammvorlagebehälter, Technikgebäude, Gasspeicher, Gasfackel) enthalten. Der KA-Ausbau für eine energetische Faulgasnutzung würde bei vollem Kostenansatz für das Jahr 2015 2,360 Mio. € bis 2,479 Mio. € kosten.

Eine Gegenüberstellung der sich durch die Szenarien ergebenden jährlichen Einsparungen und Mehrkosten sowie das sich daraus ergebende Einsparpotential und die resultierende Reduzierung der Mengengebühr, sind für das Jahr der Konzeptumsetzung (2015) sowie für 2050 gestaffelt für die jeweiligen Kostenanteile aus Tabelle 9-3 zu entnehmen.

**Tabelle 9-3:** Gesamtkosten- und Mengengebührenveränderung resultierend aus der SVZ-Konzeptumsetzung in den Szenarien, gestaffelt nach Kostenanteilen für 2015 und 2050

K <sub>At</sub>	Sz I					Sz II				Sz III			
	K - (T€)	K + (T€)	ΔK (T€)	ΔG <sub>MG</sub> (€/m³)		K - (T€)	K + (T€)	ΔK (T€)	ΔG <sub>MG</sub> (€/m³)	K - (T€)	K + (T€)	ΔK (T€)	ΔG <sub>MG</sub> (€/m³)
2015	100	-288	114	-174	-0,14	-287	168	-119	-0,10	-287	224	-63	-0,05
	90	-288	102	-186	-0,15	-287	151	-136	-0,11	-287	201	-86	-0,07
	80	-288	91	-197	-0,16	-287	134	-153	-0,13	-287	179	-108	-0,09
	70	-288	80	-208	-0,17	-287	118	-169	-0,14	-287	157	-130	-0,11
	60	-288	68	-220	-0,18	-287	101	-186	-0,15	-287	135	-153	-0,13
2050	100	-288	114	-174	-0,14	-276	217	-59	-0,06	-271	342	71	0,10
	90	-288	102	-186	-0,15	-276	195	-81	-0,08	-271	308	37	0,05
	80	-288	91	-197	-0,16	-276	174	-102	-0,10	-271	274	3	0,00
	70	-288	80	-208	-0,17	-276	152	-124	-0,13	-271	240	-31	-0,04
	60	-288	68	-220	-0,18	-276	130	-146	-0,15	-271	205	-66	-0,09

K<sub>At</sub>: Kostenanteil, K -: Kosteneinsparung, K +: Kostenmehraufwand, ΔK: Kostendifferenz (EP: Einsparpotential), ΔG<sub>MG</sub>: Mengengebührenveränderung

Zur Darstellung der Spannweite des möglichen Einsparpotentials dieser Anpassungsmaßnahme, wurde hinsichtlich der regional unterschiedlichen Baukosten die Betrachtung für die Kostenanteile von 60 % bis 100 % der Gesamtinvestitionskosten durchgeführt. Die Spannweite der Kostenanteile wurde anhand von Daten des Statistischen Bundesamtes (StatBA 2017a) gewählt. Demnach liegt beim durchschnittlichen Bruttostundenverdienst zwischen den Bundesländern ein Gradient von 31 % (zwischen Hamburg mit 19,94 € h<sup>-1</sup> und M-V mit 13,77 € h<sup>-1</sup>) vor. Im Gesamtdurchschnitt liegen die Arbeitskosten in den neuen Bundesländern um 21 % (exkl. Berlin) unter denen der alten Bundesländer.

Dies überträgt sich auch auf die Baukosten, gegenwärtig beträgt der Gradient bei den Bauwerkskosten für Neubauten in Deutschland im Nord-Süd-Vergleich 37 % (zwischen Bremen mit 1.280 € m<sup>2</sup> und Bayern mit 2.018 € m<sup>2</sup>) und im West-Ost-Vergleich 14 % (LBS 2018).

Bei der Erstinvestition für den Ausbau im Jahr 2015 fallen die geringsten jährlichen Kosten und somit das größte Einsparpotential in Sz I, bedingt durch nicht anfallende *Zinsaufwände*, mit 174 T€ bis 220 T€ an. Durch die steigenden *Kreditzinssätze* zwischen Sz II (1,5 %) und Sz III (2,5 %) verringert sich dieser Betrag auf 119 T€ bis 186 T€ (Sz II) bzw. 63 bis 153 T€ (Sz III). Innerhalb des Betrachtungszeitraumes zwischen 2015 bis 2050 erfolgen Reinvestitionen für BT, MT und ESMR. Dies führt bei den Sz II und III durch die *Inflation* zur Erhöhung des jährlichen Mehraufwandes für *Zinsen* und *Abschreibungen*. Dadurch verringert sich bei Sz II bis 2050 das Einsparpotential auf 59 T€ bis 146 T€. Bei Sz III würde sich erst ab einem Kostenanteil von 70 % durchgängig über den Betrachtungszeitraum ein Einsparpotential zeigen. Bei einem Kostenanteil von 90 % bis 100 % würden unter den angenommenen Rahmenbedingungen ab dem Jahr 2034 (n=21) und bei einem Kostenanteil von 80 % ab dem Jahr 2045 (n=35) die Mehraufwände überwiegen. In Sz III vermindert sich im Vergleich zu 2015 das Einsparpotential bis 2050 ab einem Kostenanteil von 70 % auf 31 T€ bis 66 T€.

Die hypothetische Betrachtung für den betrachteten Aufgabenträger zeigt, dass sich bereits bei vollem Kostenumfang durch den Ausbau der KA mit einer Faulgasnutzungsanlage, auch ohne den industriellen Indirekteinleiter, Einsparpotentiale ergeben würden. Je nach vorliegenden Rahmenbedingungen wäre eine Verminderung der Mengengebühr von 0,05 € m<sup>-3</sup> bis 0,14 € m<sup>-3</sup> für 2015 und 0,06 € m<sup>-3</sup> bis 0,14 € m<sup>-3</sup> bis 2050 möglich. Unter den Rahmenbedingungen von Sz III würde es bei vollem Kostenansatz jedoch zu einer Gebührenerhöhung von 0,10 € m<sup>-3</sup> kommen. In Anbetracht der Tatsache, dass die regionalen Baupreise 30 % bis 40 % niedriger sind in M-V, würden die Einsparpotentiale und damit die Mengengebührensenkungen, betrachtet über alle drei Szenarien, mit 0,04 bis 0,18 € m<sup>-3</sup> höher ausfallen.

### 9.2 Zentralisierung der Abwasserbehandlung

Bereits im Vorfeld dieser Untersuchung wurde eine Machbarkeitsstudie im Rahmen einer Masterthesis für zwei Ortschaften innerhalb des betrachteten Aufgabenträgergebietes bezüglich der Umsetzung einer *Zentralisierung* oder dem Erhalt der dezentralen Struktur durchgeführt. Die Untersuchung von Möller (2016) ergab, dass der Erhalt der gegenwärtigen dezentralen Struktur die Vorzugsvariante darstellt. Die Ergebnisse der dynamischen Kostenvergleichsrechnung dieser Arbeit können, durch eine modulare Implementierung der Anpassungsmaßnahme *Zentralisierung* in das Basismodell, für eine Plausibilitätskontrolle genutzt und ggf. bestätigt werden.

Im ersten Schritt der Untersuchung wurde die Konzeptauswahl der statischen Vorbetrachtung (siehe Kap. 5.3) ausgewertet. Bei der Vorbetrachtung werden die Investitionskosten, Mehraufwände sowie Einsparungen zum Zeitpunkt des ersten Prognosejahrs (n=2) ermittelt. Da die *Inflationsrate* für das eine Jahr aufgrund der geringen Auswirkungen auf die Teuerung der *Personal*-, *Material*- und Investitionskosten vernachlässigbar ist, die *Abschreibungen* beim selben Kostenanteil in allen Szenarien gleich sind, ist der *Kreditzinssatz* bei der Vorbetrachtung in der ersten Phase des Maßnahmenkonzeptes der ausschlaggebende Rahmenparameter.

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

Im Zuge der Auswertung der Vorbetrachtung standen die Anzahl der in das *Zentralisierungskonzept* eingebundenen KA sowie die Kostenreduzierung durch die Umsetzung des Konzeptes für unterschiedliche Kostenanteile der Gesamtinvestitionskosten im Fokus. Das Ergebnis dieser Auswertung ist für die Szenarien I-III in Tabelle 9-4 präsentiert.

**Tabelle 9-4:** Anzahl der Überleitungen und Kostenersparnis bei unterschiedlichen Kostenfaktoren zur Senkung der Gesamtinvestitionskosten

K <sub>AI</sub> (%)	Sz I		Sz II		Sz III	
	Anz. ÜL (-)	ΔK (T€)	Anz. ÜL (-)	ΔK (T€)	Anz. ÜL (-)	ΔK (T€)
100	1	-3,6	0	0	0	0
90	1	-5,4	0	0	0	0
80	1	-7,2	1	-1,2	0	0
70	1	-8,9	1	-4,9	1	-0,4
60	1	-10,7	1	-8,1	1	-5,5
50	2	-13,1	1	-11,6	1	-10,7
40	2	-18,5	1	-15,0	1	-15,8
30	3	-21,4	2	-19,9	1	-20,9
20	5	-39,1	5	-35,4	4	-98,9

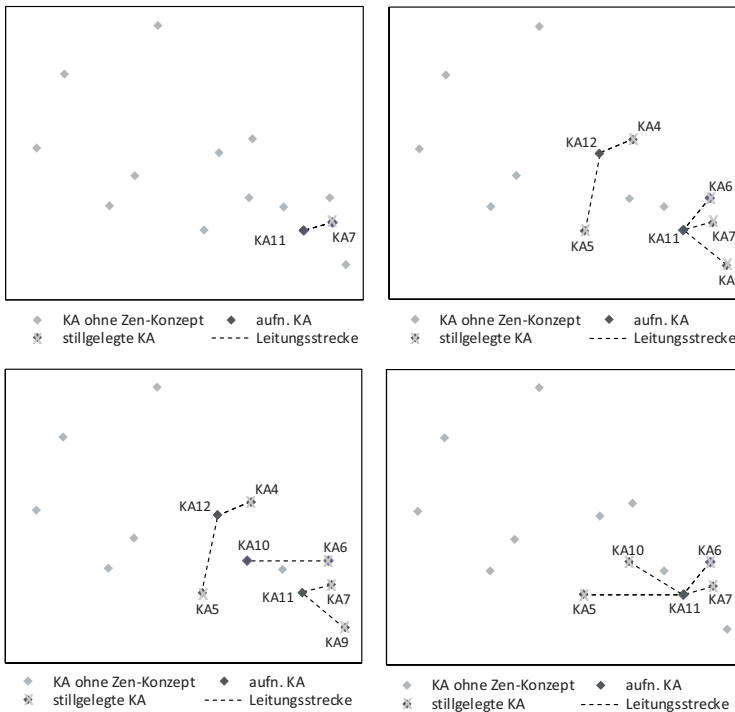
K<sub>AI</sub>: Kostenanteil, Anz. ÜL: Anzahl Überleitungen, ΔK: Kostendifferenz aus Einsparungen und Mehraufwänden (EP: Einsparpotential)

Die in Tabelle 9-4 enthaltenen relativen Kostenanteile wurden nur zu Demonstrationszwecken des Rechenalgorithmus bis auf 20 % fortgeführt. Denn erst ab einem Kostenanteil von 20 % ergeben sich bei allen drei Szenarien *Zentralisierungskonzepte* mit mehr als einer überzuleitenden und stillzulegenden KA. Auch die Konzeptkomplexität nimmt aufgrund der Anzahl, der in das Konzept eingebundenen KA zu. Beim *Kreditzinssatz* von 0 % (Sz I) ergibt sich bei vollem Kostenanteil ein *Zentralisierungskonzept* mit einer Überleitung. Durch die Stilllegung von KA 7 und Überleitung zu KA 11 (*Zentralisierungskonzepte* für alle Kostenanteile sind in tabellarischer Form in Anhang 18 zu finden) könnten, nach Verrechnung der Einsparungen gegenüber den Mehraufwänden, pro Jahr 3,6 T€ eingespart werden. Dieses Konzept führt jedoch nur zu Einsparungen bei einem *Kreditzinssatz* von 0 %, bei 2 % bis 4 % überwiegen die Mehraufwände, weshalb für beide Szenarien bei vollem Kostenanteil kein Konzeptvorschlag resultiert. Dasselbe *Zentralisierungskonzept* führt bei Sz II erst ab einem Kostenanteil von 80 % und bei Sz III ab einem Kostenanteil von 70 % zu geringen Einsparungen. Bis zu einem Kostenanteil von 60 % für Sz I, 40 % für Sz II und 30 % für Sz III bleibt die o.g. Konzeptlösung, mit einer Überleitung, als Vorzugsvariante bestehen. Die maximale Anzahl von Überleitungen in einem *Zentralisierungskonzept* ergibt sich bei einem Kostenanteil von 20 % für Sz I und Sz II mit 5 Überleitungen. Für Sz III ergeben sich bei gleichem Kostenanteil 4 Überleitungen. Das für diesen Kostenanteil resultierende jährliche Einsparpotential in den jeweiligen Szenarien beträgt 39,1 T€ (Sz I), 35,4 T€ (Sz II) und 98,9 T€ (Sz III). Das größere Einsparpotential bei Sz I im Vergleich zu Sz II lässt sich aus den geringeren Mehraufwänden ableiten, welche sich, bezogen auf die Investitionen, ausschließlich aus den *Abschreibungen* ergeben. Das im Vergleich zu Sz I höhere Einsparpotential bei Sz III resultiert, auch im Falle desselben Konzeptvorschlags (mit denselben integrierten KA sowie Überleitungsverbindungen), aus der Differenz zwischen Reinvestitionskosten der stillzulegenden KA

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

und den Investitionskosten des *Zentralisierungskonzeptes*. Durch den höheren *Kreditzinssatz* in Sz III ergibt sich, bezogen auf den *Zinsaufwand*, ein größeres Einsparpotential.

Zur Veranschaulichung unterschiedlicher Varianten sind in Abbildung 9-2 das *Zentralisierungskonzept* mit einer Überleitung, welche bis zu einem Kostenanteil von 60 % für alle drei Szenarien zutreffend ist (Abbildung 9-2, oben-links) sowie die Konzepte bei einem Kostenanteil von 20 % jeweils für Sz I (Abbildung 9-2, oben-rechts), Sz II (Abbildung 9-2, unten-links) und Sz III (Abbildung 8-2, unten-rechts) abgebildet.



**Abbildung 9-2:** Resultierende Zentralisierungskonzepte bei einem Kostenanteil von 60 % (Sz I-Sz III) bis 100 % (Sz I, oben-links), einem Kostenanteil von 20 % für Sz I (oben-rechts), Sz II (unten-links) und Sz III (unten-rechts)

Das *Zentralisierungskonzept*, welches bei einem Kostenanteil von bis zu 70 % realistisch für alle drei Szenarien ist und anschließend noch näher betrachtet wird, beinhaltet eine Überleitung von KA 7 nach KA 11. Diese Überleitung in Verbindung mit einer Überleitung von KA 6 zu KA 7, ist Gegenstand der

Untersuchung in Möller (2016). Dieses *Zentralisierungskonzept* ist die Vorzugsvariante der Kostenvergleichsrechnung. In der hier untersuchten Modellbetrachtung ist, ab einem Kostenanteil von 100 %, ausschließlich die Überleitung von KA 7 nach KA 11 als Ergebnis favorisiert. Ab einem Kostenanteil von 30 % (siehe Anhang 18) würde statt der von Möller (2016) untersuchten Überleitung von KA 6 zu KA 11 über KA 7 eine direkte Überleitung nach KA 11 die Konzeptvorzugsvariante darstellen.

Die *Zentralisierungskonzepte* bei einem Kostenanteil von 20 % integrieren mehrere KA in das Konzept. Für Sz I würde es zwei Gruppen- bzw. Clusterlösungen geben. Zum einen würden KA 5 und KA 4 nach KA 12 und zum anderen KA 7 sowie KA 9 nach KA 11 überleiten. Die Gruppenlösungen wurden im Modell auf mögliche Reihenschaltungen hin überprüft. Durch eine Reihenüberleitung würde sich die Abwassermenge je Ortschaft kumulieren, dies würde zu größeren Rohrdurchmessern und Förderleistungen der Pumpen führen und somit die Investitionskosten erhöhen. Einsparpotentiale bei einer Reihenüberleitung stehen demzufolge in Abhängigkeit von der Lage, Verfahrenstechnik, Abwassermenge und den Baukosten. Im Vergleich würden die Investitionskosten einer Reihenüberleitung mit KA 6, KA 7, KA 9 zu KA 11 in Sz II 840 T€, statt 808 T€ (bei Einzelüberleitungen) betragen. Auch für KA 5, KA 4 und KA 12 sind Einzelüberleitungen einer Reihenüberleitung aus ökonomischen Gesichtspunkten zu bevorzugen. Für die optimale Konzeptvariante würden Investitionskosten der Reihenüberleitung von 983 T€ denen der Einzelüberleitungen in Höhe von 810 T€ gegenüberstehen. In Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen des Szenarios resultieren differenzierte Konzeptvorschläge für diese Auswahl von KA. In Sz III findet eine Überleitung von KA 5 zu KA 11 anstelle zu KA 12 statt. Die Mehraufwände für eine Überleitung von KA 4 zu KA 12 übersteigen in Sz III die Einsparungen, weshalb diese Überleitung wegfällt. Analog verhält es sich mit der Überleitung von KA 6 zu KA 10 in Sz I, welche ab Sz II nach KA 11 überleitet. Bei KA 10 hingegen kommt es erst in Sz III, durch die Überleitung nach KA 11, zu einem Einsparpotential.

Folgend wird die Überleitung von KA 7 zu KA 11 für die drei Szenarien detaillierter betrachtet. Tabelle 9-5 beinhaltet eine Gegenüberstellung der Anlagenspezifika für den direkten Vergleich. In Tabelle 9-6 sind die Auswirkungen der Abwasseraufnahme von KA 7 für KA 11 aufgezeigt.

**Tabelle 9-5:** KA-Charakteristik von KA 7 und KA 11

Parameterbezeichnung	Einheit	KA 7	KA 11
Typ	(-)	BB	TK <sub>ub</sub>
GK	(-)	1	1
EW <sub>KA,Dim</sub>	(EW)	180	1.000
EW <sub>KA,Nom</sub>	(EW)	233	783
K <sub>P,KA</sub>	(€ a <sup>-1</sup> )	3.634	1.817
K <sub>LAB</sub>	(€ a <sup>-1</sup> )	700	460
E <sub>el,Verbr</sub>	(kWh a <sup>-1</sup> )	13.304	0

GK: Größenklasse, EW<sub>KA,Dim</sub>: Ausbaugröße KA, EW<sub>KA,Nom</sub>: Nominale Auslastung, K<sub>P,KA</sub>: Wartungskosten (Personalkosten KA), K<sub>LAB</sub>: Kosten für Laboranalysen, E<sub>el,Verbr</sub>: elektr. Energieverbrauch

**Tabelle 9-6:** Auswirkungen der Überleitung von KA 7 zu KA 11 auf die Anlagen Charakteristik

Parameterbezeichnung	Einheit	KA 11
GK	(-)	2
EW <sub>KA,Nom</sub>	(EW)	16
K <sub>P,KA</sub>	(€ a <sup>-1</sup> )	1.817
K <sub>LAB</sub>	(€ a <sup>-1</sup> )	1.440
E <sub>el,Verbr</sub>	(kWh a <sup>-1</sup> )	0

Die stillzulegende KA ist eine konventionelle Belebungsanlage, hat eine Ausbaugröße von 180 EW und wird gegenwärtig unter Überlast mit einer nominalen Auslastung von 233 EW betrieben. Bei der



## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

aufnehmenden KA handelt es sich um eine unbelüftete TKA mit einer Ausbaugröße von 1.000 EW und einer Auslastung von 783 EW. Beide KA sind der GK 1 zu zuordnen. Die Distanz zwischen beiden KA beträgt 2,6 km. Durch eine Überleitung des Abwassers von KA 7, würde die Kapazität von KA 11 mit 16 EW überschritten. Dadurch würde bei einer Erweiterung der KA diese in die Rubrik der GK 2 fallen. Gemäß SÜVO würde dies einen höheren Wartungsaufwand von 1,8 T€ a<sup>-1</sup> als auch höhere Laborkosten von 1,4 T€ a<sup>-1</sup> bedeuten. In Bezug auf die Verfahrenstechnik der aufnehmenden KA fällt kein zusätzlicher *Energiebedarf* an. Durch die Stilllegung von KA 7 werden 13.304 kWh eingespart. Das PWK hätte aufgrund der geringen Abwassermengen einen *Energieverbrauch* von 1.059 kWh a<sup>-1</sup>. Aufgrund des Neubaus der Überleitung entstehen Instandhaltungsarbeiten erst nach vielen Jahren, weshalb für den Betrieb der Überleitung bezogen auf den Betrachtungszeitraum durchschnittlich 0,2 T€ a<sup>-1</sup> einzuplanen wären. Durch die Verrechnung der Einsparungen mit den Mehraufwänden bei den *Material-/ Personalkosten* resultiert ein Einsparpotential von 3,5 T€. Zusätzlich werden diesem Betrag die Einsparungen durch wegfallende *Abschreibungen* und *Zinsen* der KA 7 hinzugefügt. Diese variieren jedoch in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen von den Szenarien. Eine Übersicht, der sich ergebenden Einsparpotentiale aus der Vorbetrachtung, sind für alle drei Szenarien und Kostenanteile von 20 % bis 100 % in Anhang 18 zu finden.

Durch die Integration des Zentralisierungskonzeptes in das dynamische Kostenmodell und Asset-Assessment, wird das Jahr für die Konzeptumsetzung sowie die zu diesem Zeitpunkt resultierenden Kosten und Einsparungen ermittelt. Nach erfolgter *Abschreibung* von KA 7 im Jahr 2034 würde basierend auf den Annahmen das Konzept umgesetzt werden. Für die Umsetzung entstehen bei Kostenanteilen von 50 % bis 70 % folgende in Tabelle 9-7 aufgezeigten Investitionskosten, *Abschreibungen* und *Zinsaufwände*.

**Tabelle 9-7:** Investitionskosten, Abschreibungen und Zinsen aus der dynamischen Kostenberechnung für die Überleitung von KA 7 zu KA 11 bei Kostenanteilen von 50 bis 70 %

Investitionskosten						
K <sub>At</sub> (%)	Kanal			PWK		
	Sz I (T€)	Sz II (T€)	Sz III (T€)	Sz I (T€)	Sz II (T€)	Sz III (T€)
70	555	-	-	28	-	-
60	476	650	-	24	33	-
50	396	542	666	20	27	33
Abschreibung						
K <sub>At</sub> (%)	Kanal			PWK		
	Sz I (T€)	Sz II (T€)	Sz III (T€)	Sz I (T€)	Sz II (T€)	Sz III (T€)
70	11	-	-	1	-	-
60	10	13	-	1	2	-
50	78	11	27	0,9	1	2

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

### Zinsen

K <sub>At</sub> (%)	Kanal			PWK		
	Sz I (T€)	Sz II (T€)	Sz III (T€)	Sz I (T€)	Sz II (T€)	Sz III (T€)
70	0	-	-	0	-	-
60	0	13	-	0	2	-
50	0	11	13	0	0,5	1

K<sub>At</sub>: Kostenanteil

Bei der Integration des *Zentralisierungskonzeptes* in die dynamische Kostenberechnung ergeben sich, durch die Verteuerung bis zum Jahr der Konzeptumsetzung, andere Resultate bei den Einsparpotentialen. Aufgrund dessen sind bei einem Kostenanteil von 70 % in Sz II und Sz III die Mehraufwände größer als die Einsparpotentiale, weshalb es zu keiner Umsetzung der Konzeptvorauswahl kommt. Erst ab einem Kostenanteil von 50 % würde es zur Konzeptumsetzung in allen drei Szenarien kommen. Im Vergleich zu den Annahmen der dynamischen Kostenvergleichsrechnung von Möller (2016), würden für dieses Konzept Investitionskosten von 397 T€ entstehen. Dies entspricht einem Kostenanteil von kleiner 50 % der aus den Kostenfunktionen abgeleiteten Investitionskosten und unterstützt die Aussage bezüglich der regional unterschiedlichen Baupreise. Basierend auf den Investitionskosten würden jährliche Kosten je nach Kostenanteil und Szenario in einer Spanne von 8 T€ a<sup>-1</sup> bis 11 T€ a<sup>-1</sup> in Sz I, 22 T€ a<sup>-1</sup> bis 26 T€ a<sup>-1</sup> in Sz II und bis zu 40 T€ in Sz III, entstehen. Dementgegen würden statt einer Reinvestition durch die Stilllegung von KA 7 je nach Szenario jährliche Aufwände für *Abschreibungen* und *Zinsen* von 12 T€ a<sup>-1</sup> bis 42 T€ eingespart werden. In der Summe ergäbe dies eine Einsparung von 1 T€ a<sup>-1</sup> bis 4 T€ in Sz I, von 0 T€ a<sup>-1</sup> bis 4 T€ in Sz II und bis zu 2 T€ in Sz III.

Neben den Einsparungen für die Finanzierung der Sachanlagen würden sich zusätzlich folgende in Tabelle 9-8 enthaltene Einsparungen beim Anlagenbetrieb, für die drei Szenarien in 2050 ergeben.

**Tabelle 9-8:** Einsparungen durch die Zentralisierung im Bereich des Anlagenbetriebs unterteilt in die betreffenden Kostenarten je Szenario

Kostenart	Einheit	Sz I	Sz II	Sz III
ΔK <sub>P</sub>	(T€)	-2	-3	-4
ΔK <sub>B</sub>	(T€)	-1	-2	-2
ΔK <sub>L</sub>	(T€)	-0,2	-0,3	-0,4
ΔK <sub>sAw</sub>	(T€)	0	0	0

Δ: Differenzen in den Kostenarten, K<sub>P</sub>: Personalkosten, K<sub>B</sub>: Betriebsstoffe, K<sub>L</sub>: Bezogene Leistungen, K<sub>sAw</sub>: Sonstige Aufwendungen

In Tabelle 9-8 sind die in den Kostenarten entstehenden Einsparungen mit den Mehraufwänden verrechnet. Die Personalkostenentwicklung ist der *Inflationsrate* der Szenarien gleichgesetzt, demnach könnten in Abhängigkeit des Szenarios bei den *Personalkosten* von 2 T€ a<sup>-1</sup> bis 4 T€ a<sup>-1</sup> eingespart werden. Bei den *Betriebsstoffen* besteht die Einsparung ausschließlich aus der Reduktion des *Energieverbrauchs*; sie beträgt von 1 T€ a<sup>-1</sup> bis 2 T€ a<sup>-1</sup>. Aus der Differenz der Einsparungen bei den

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

Laboranalysekosten und den Mehraufwänden durch die Kanalreparaturen würden sich in dieser Kostenposition Einsparungen von  $0,2 \text{ T€ a}^{-1}$  bis  $0,4 \text{ T€ a}^{-1}$  ergeben.

In Tabelle 9-9 sind die durch die Einsparungen bedingten Veränderungen der Gesamtkosten sowie die daraus ermittelte Mengengebührenveränderung für die drei Szenarien enthalten.

**Tabelle 9-9:** Gesamtkosten- und Mengengebührenveränderung durch die Zentralisierung in den Szenarien bei einem Kostenanteil von 50 bis 70 %

K <sub>AI</sub> (%)	$\Delta K_{Ges}$ (T€ a <sup>-1</sup> )			$\Delta G_{MG}$ (ct m <sup>-3</sup> )		
	Sz I	Sz II	Sz III	Sz I	Sz II	Sz III
70	-3	-	-	-0,2	-	-
60	-5	-3	-	-0,3	-0,2	-
50	-7	-7	-6	-0,4	-0,5	-0,5

K<sub>AI</sub>: Kostenanteil, K<sub>Ges</sub>:Veränderung der Gesamtkosten,  $\Delta G_{MG}$ : Mengengebührenveränderung

Durch die Stilllegung von KA 7 und die Überleitung des Abwassers zu KA 11 würden sich insgesamt jährliche Einsparungen je nach Kostenanteil von  $3 \text{ T€ a}^{-1}$  bis  $7 \text{ T€ a}^{-1}$  in Sz I,  $3 \text{ T€ a}^{-1}$  bis  $7 \text{ T€ a}^{-1}$  € in Sz II und  $6 \text{ T€ a}^{-1}$  bis  $7 \text{ T€ a}^{-1}$  in Sz III ergeben. Hinsichtlich der geringen Beträge würde bei allen Szenarien, da die Reduzierung der Mengengebühr weniger als ein Cent beträgt, zu keiner Entlastung der Haushalte bis 2050 führen.

### 9.3 Zusammenschluss von Aufgabenträgern

Das Entsorgungsgebiet des exemplarischen Aufgabenträgers grenzt an das von vier anderen Aufgabenträgern (Details in Anhang 20), welche für eine *Fusionierung* bzw. *Kooperation* im Bereich der Organisations- und Infrastrukturen in Frage kämen und folgend näher betrachtet werden.

Zur Vorauswahl eines Aufgabenträgers für die *Fusion* werden zunächst die Gebühren-Vor-/Nachteile mit einer sich hypothetisch ergebenden einheitlichen Gebühr betrachtet. Diesbezüglich ist der Tabelle 8-10 folgendes zu entnehmen: Die resultierenden Grund- und Mengengebühren, die daraus kalkulierten Jahresumsätze, die Veränderung der Haushaltsbelastungen des betrachteten als auch des anderen fusionierenden Aufgabenträgers sowie der für die weitere Betrachtung bedeutende EW-Anteil des betrachteten am fusionierten Aufgabenträgers.

**Tabelle 9-10:** Überblick über die Vergleichskenndaten der vier angrenzenden Aufgabenträger

Aufgabenträger	Jahresumsatz (Mio. €)	Anteil EW (-)	G <sub>GG</sub> (€ a <sup>-1</sup> )	G <sub>MG</sub> (€ m <sup>-3</sup> )	$\Delta \text{PKB}_{ZPH}$	
					AT <sub>B</sub> (€ a <sup>-1</sup> )	AT <sub>fus.</sub> (€ a <sup>-1</sup> )
Fu-AT I	9,002	0,75	60,46	2,54	-4,61	5,46
Fu-AT II	8,240	0,64	69,24	2,76	9,36	-20,30
Fu-AT III	8,811	0,71	78,28	2,79	14,96	-21,21
Fu-AT IV	11,361	0,53	52,69	2,63	-4,68	3,12

G<sub>GG</sub>: Grundgebühr, G<sub>MG</sub>: Mengengebühr,  $\Delta \text{PKB}_{ZPH}$ : Veränderung der PKB eines ZPH, AT<sub>B</sub>: Betrachteter Aufgabenträger, AT<sub>fus.</sub>: Neugebildeter Abwasserzweckverband nach Fusion

Bei einer theoretischen einheitlichen Gebührenordnung würden sich für den betrachteten Aufgabenträger ausschließlich Gebührenvorteile ergeben, wenn die Gesamtkosten der Abwasserentsorgung je

Kubikmeter gereinigten Schmutzwassers größer sind als die des anderen fusionierenden Aufgabenträgers. Dadurch kommt es zur Umverteilung der Kosten zu Gunsten der schwächeren Struktur. Eine Reduzierung der PKB würde sich bei einer *Fusion* mit dem AT I mit 4,61 € a<sup>-1</sup> und AT IV mit 4,68 € a<sup>-1</sup> ergeben. Aus Sicht der anderen Aufgabenträger wäre eine *Fusion* mit dem betrachteten Aufgabenträger nur für AT II (20,30 € a<sup>-1</sup>) und AT III (21,21 € a<sup>-1</sup>) vom Vorteil.

Für die Ermittlung des Gesamteinsparpotentials eines *Zusammenschlusses* ist die Betrachtung der Kostenarten aus den Jahresabschlüssen der einzelnen Aufgabenträger erforderlich. Diese liegen, mit Ausnahme von AT I, nicht vor. Zur Durchführung der Potentialanalysen wurden die Kostenarten, basierend auf den berechneten Jahresumsätzen anhand der durchschnittlichen Kostenstruktur eines repräsentativen Aufgabenträgers der Abwasserwirtschaft in M-V aus Gießler und Tränckner (2014), hergeleitet. Begründet durch die Organisationsstruktur eines Betreiberkonzeptes von AT I sind keine *Personalkosten* angegeben, diese sind in den *bezogenen Leistungen* enthalten und lassen sich nicht extrahieren. Aus diesem Grund wurden für AT I die *Personalkosten* als auch die Kosten für *bezogene Leistungen* mittels der Kostenstruktur von M-V ermittelt.

Unter Annahme der in Anhang 19 beschriebenen, durch die *Fusion* bzw. *Kooperation* hervorgehenden Einspareffekte in der Verwaltung als auch in der Materialbeschaffung und bei den Leistungsverträgen, lassen sich für das erste Jahr des *Zusammenschlusses* folgende in Tabelle 9-11 dargestellten Personals als auch Gesamteinsparungen sowie die Mengengebührenveränderungen und PKB ableiten. Neben den Einsparpotentialen einer *Fusion* sind zudem auch die einer *Kooperation*, zum einen bei Aufteilung der Einsparungen nach EW-Anteilen als auch nach Aufteilung zu gleichen Anteilen je Fusionspartner (50:50), aufgeführt.

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

**Tabelle 9-11:** Veränderungen der Kosten, Mengengebühr und Haushaltsbelastung eines ZPH für das erste Jahr (2015) des Zusammenschlusses

	Betrachtung	$\Delta K_P$ (T€ a <sup>-1</sup> )	$\Delta K_{Ges}$ (T€ a <sup>-1</sup> )	$\Delta G_{MG,Fu}$ (€ m <sup>-3</sup> )	PKB <sub>ZPH</sub> (€ a <sup>-1</sup> )
AT I	Fusion	-328 (-18,6 %)	-716 (-8,0 %)	-0,29	129
	Koop. (EW)	-83 (-6,7 %)	-373 (-7,7 %)	-0,24	136
	Koop. (50 %)	-164 (-14,2 %)	-358 (-7,4 %)	-0,24	136
AT II	Fusion	-328 (-15,8 %)	-519 (-6,3 %)	-0,34	141
	Koop. (EW)	-119 (-9,9 %)	-242 (-5,0 %)	-0,22	139
	Koop. (50 %)	-164 (-14,2 %)	-260 (-5,4 %)	-0,16	142
AT III	Fusion	-328 (-17,6 %)	-539 (-6,1 %)	-0,22	151
	Koop. (EW)	-95 (-7,8 %)	-245 (-5,1 %)	-0,18	139
	Koop. (50 %)	-164 (-14,2 %)	-269 (-5,6 %)	-0,16	139
AT IV	Fusion	-328 (-13,2 %)	-586 (-5,2 %)	-0,13	135
	Koop. (EW)	-154 (-13,2 %)	-291 (-6,0 %)	-0,19	138
	Koop. (50 %)	-164 (-14,2 %)	-293 (-6,1 %)	-0,19	138

Δ: Differenzen in den Kosten und Gebühren,  $\Delta K_P$ : Personalkosten,  $K_{Ges}$ : Gesamtkosten,  $G_{MG,Fu}$ : Mengengebühr bei Fusion, PKB<sub>ZPH</sub>: PKB eines ZPH

Das Einsparpotential im ersten Jahr der Maßnahmenumsetzung beträgt bei den *Fusionen* der jeweiligen Aufgabenträger von 519 T€ a<sup>-1</sup> bis 716 T€ a<sup>-1</sup> (5,2 % bis 8,0 %), darin enthalten sind *Personalkosteneinsparungen* von 83 T€ a<sup>-1</sup> bis 328 T€ a<sup>-1</sup> (13,2 % bis 18,6 %). In Abhängigkeit von der Schmutzwassermenge des aus der *Fusion* hervorgehenden neuen Aufgabenträgers, würde dies eine Reduzierung der Mengengebühr von 0,13 € m<sup>-3</sup> bis 0,34 € m<sup>-3</sup> bedeuten, wobei ein *Zusammenschluss* mit AT II die höchste Reduzierung der Mengengebühr aufweist. Doch in Anbetracht der aus der *Fusion* hervorgehenden neuen Grund- und Mengengebühr, resultiert die geringste PKB für einen ZPH bei einer *Fusion* mit AT I. Bei den *Kooperationen* würde bei einer EW-anteiligen Ersparnisaufteilung das Gesamteinsparpotential von 242 T€ a<sup>-1</sup> bis 373 T€ a<sup>-1</sup> (5,0 % bis 7,7 %) betragen, wovon 83 T€ a<sup>-1</sup> bis 154 T€ a<sup>-1</sup> (6,7 % bis 13,2 %) *Personalkosteneinsparungen* enthalten sind. Die Mengengebührenveränderung würde von 0,18 € m<sup>-3</sup> bis 0,24 € m<sup>-3</sup> und eine PKB eines ZPH zwischen 136 T€ a<sup>-1</sup> bis 139 T€ a<sup>-1</sup> beim betrachteten Aufgabenträger betragen. Aufgrund des höheren EW-Anteils des betrachteten Aufgabenträgers ist dessen Anteil an den Verwaltungskosten und Mehraufwänden in allen *Fusionsvarianten* höher als bei den Fusionspartnern. Dem gegenüber stehen hingegen die Einsparungen, welche zugunsten des betrachteten Aufgabenträgers hinsichtlich der EW höher ausfallen, jedoch nicht die EW-anteiligen Mehrkosten kompensieren, weshalb das Einsparpotential bei der Aufteilung zu gleichen Teilen (50:50) mit einem Gesamteinsparpotential von 260 T€ a<sup>-1</sup> bis 358 T€ a<sup>-1</sup>

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

(5,4 % bis 7,7 %), mit enthaltenen *Personalkosteneinsparungen* von 164 T€ a<sup>-1</sup> (14,2 %), etwas höher ausfällt. Die bei allen Fusionspartnern gleichen *Personalkosteneinsparungen* entstammen der Annahme, dass bei einer *Fusion*, die Personalstärke der neuen, der Personalstärke der vorher größeren Verwaltung entspricht. Somit entsprechen die *Personalkosteneinsparungen* den *Personalkosten* der Verwaltung des betrachteten kleineren Fusionspartners.

Durch eine *Fusion* mit einem der angrenzenden Aufgabenträger wäre eine Verringerung der PKB von 3,6 % bis 11,8 % umsetzbar. Eine Ausnahme bildet eine *Fusion* mit AT III, in diesem Fall ergäbe sich aufgrund der resultierenden vereinheitlichten Gebühren (inkl. der Einsparungen) des neuen Aufgabenträgers eine Erhöhung um 3,3 %. Bei den *Kooperationen* führen alle Varianten zu einer Reduzierung von 2,9 % bis 5,6 % der Belastung. Das Minimum mit 2,9 % würde sich bei einer *Kooperation* mit AT II und einer Aufteilung der Einsparungen in gleichen Anteilen ergeben. Das höchste Einsparpotential der Haushaltsbelastung weisen die *Fusionen* und *Kooperationen* mit AT I (11,8 %/7,0 %) und AT IV (7,7 %/5,6 %) auf.

Hinsichtlich der im folgenden Kapitel beschriebenen Vorteile, welche sich durch die Kombination mit den infrastrukturellen Anpassungsmaßnahmen ergeben, findet eine detaillierte Betrachtung der Auswirkungen einer *Fusion* oder *Kooperation* zwischen dem betrachteten Aufgabenträger und AT IV statt. Die Einsparpotentiale im Betrachtungszeitraum vom ersten Jahr der *Fusion* bzw. *Kooperation* 2015 bis 2050 für alle drei Szenarien sind in Tabelle 9-12 präsentiert.

**Tabelle 9-12:** Veränderung der Kosten und Mengengebühren bei einer Fusion oder Kooperation von AT IV mit dem betrachteten Aufgabenträger in den Szenarien für 2015 und 2050

Position	Einheit	2015			2050		
		Sz I	Sz II	Sz III	Sz I	Sz II	Sz III
$\Delta K_P$	(T€ a <sup>-1</sup> )	-290	-291	-298	-290	-489	-689
$\Delta K_B$	(T€ a <sup>-1</sup> )	-258	-246	-248	-258	-408	-574
$G_{MG,Fu}$	(€ m <sup>-3</sup> )	2,52	2,52	2,52	3,14	4,63	6,65
$\Delta G_{MG,Fu}$	(€ m <sup>-3</sup> )	-0,13	-0,13	-0,13	-0,12	-0,24	-0,38
$\Delta G_{MG,Ko}$	(€ m <sup>-3</sup> )	-0,23	-0,25	-0,26	-0,21	-0,51	-1,03

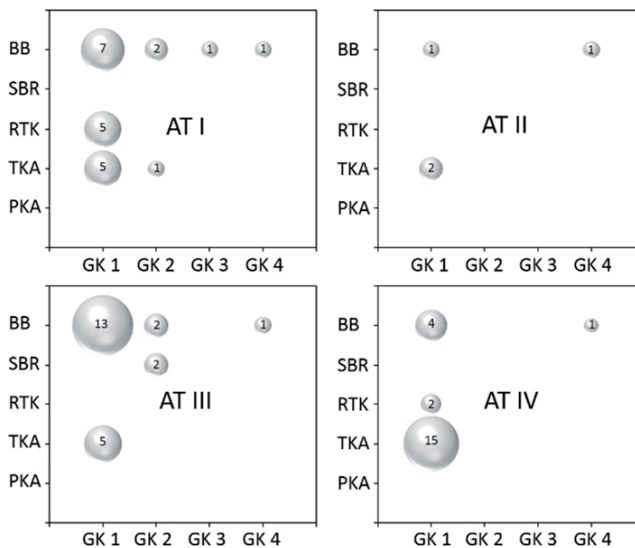
Δ: Differenzen in den Kostenarten und Gebühren, K<sub>P</sub>: Personalkosten, K<sub>B</sub>: Betriebsstoffe,  
G<sub>MG,Fu</sub>: Mengengebühren bei Fusion, G<sub>MG,Ko</sub>: Mengengebühr bei Kooperation

Bedingt durch die *Inflation* und das Bezugsjahr der Modellbetrachtung 2014 variieren die Einsparungen bereits im ersten Jahr der *Zusammenschlussbetrachtung* zwischen den einzelnen Szenarien. Bis zum Jahr 2050 würde sich der Betrag der jährlichen Einsparung bei den *Personalkosten* je nach Szenario von 290 T€ a<sup>-1</sup> bis 689 T€ a<sup>-1</sup> belaufen. Die Einsparungen bei den *Betriebsstoffen*, *bezogenen Leistungen* und *sonstigen Aufwendungen*, welche hier unter *Betriebskosten* (exklusive Kapitalkosten) zusammengefasst sind, betragen zwischen 258 T€ a<sup>-1</sup> bis 574 T€ a<sup>-1</sup>. In der Summe könnten für das Jahr 2050 die Gesamtkosten um 548 T€ a<sup>-1</sup> bis 1.263 T€ a<sup>-1</sup> gesenkt werden. Dies entspricht einem Einsparpotential von 5 % bis 10 % bezogen auf den Jahresumsatz in 2050. Über den Betrachtungszeitraum von 36 Jahren würde die Einsparung über den Zeitraum in der Summe 19,2 Mio. € bis 30,5 Mio. € betragen. Die jährlichen Einsparungen führen in 2015 bei einer *Fusion* direkt zu einer Reduzierung der Mengengebühr von 0,13 € m<sup>-3</sup> a<sup>-1</sup> und bei einer *Kooperation* unter Annahme einer

EW-anteiligen Aufteilung der Einsparung von  $0,23 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$  bis  $0,26 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ . Bis zum Jahr 2050 erhöht sich die Gebührenminderung für den neuen aus der *Fusion* hervorgegangenen Aufgabenträger um  $0,12 \text{ € m}^{-3}$  bis  $0,38 \text{ € m}^{-3}$ . Nach Abzug der Minderung ergibt sich für 2050 eine Mengengebühr in Abhängigkeit vom Szenario zwischen  $3,14 \text{ € m}^{-3}$  (Sz I) bis  $6,65 \text{ € m}^{-3}$  (Sz III). Für den betrachteten Aufgabenträger würde eine Reduzierung zwischen  $0,21 \text{ € m}^{-3}$  bis  $1,03 \text{ € m}^{-3}$  bei einer resultierenden Mengengebühr von  $2,85 \text{ € m}^{-3}$  (Sz I) bis  $9,48 \text{ € m}^{-3}$  (Sz III) zu erwarten sein.

#### 9.4 Kombinationen von Anpassungsmaßnahmen

Neben den Einsparungen in der Verwaltung oder durch Optimierungen der Materialeinkäufe und Leistungsverträge, können ggf. zusätzliche Einsparpotentiale durch Synergien bei gemeinschaftlichen Infrastrukturanpassungen entstehen. In diesem Zusammenhang werden in einem weiteren Schritt Kombinationen zwischen den Anpassungskonzepten *Fusion/Kooperation* mit *Zentralisierung* (*Fu-Zen* und *Ko-Zen*) sowie *Fusion/Kooperation* mit *Schlammverwertungszentren* (*Fu-SVZ* und *Ko-SVZ*) untersucht. Für die beiden infrastrukturellen Anpassungsmaßnahmen ist sowohl die Lage der KA-Standorte als auch deren Verfahrensweise von Relevanz. Zum Überblick ist der KA-Bestand in Abbildung 9-3 für die vier angrenzenden Aufgabenträger dargestellt. In der Grafik ist die Anlagenanzahl in Abhängigkeit von der Verfahrenstechnik und GK zugeordnet.



**Abbildung 9-3:** KA-Bestand der vier angrenzenden Aufgabenträger unterteilt nach GK und Verfahrenstechnik

Die Anzahl an KA beträgt für AT I 22, AT II 4, AT III 23 und für AT IV 22. In jedem Gebiet der vier Aufgabenträger existiert eine KA mit GK 4. Der Anteil der KA der GK 1 ist bei allen Aufgabenträgern am stärksten ausgeprägt. Unterschiede bestehen in der vorhandenen Verfahrenstechnik. Bei AT I und AT III dominieren die technischen Verfahren zur biologischen Abwasserreinigung (BB, SBR, RTK), bei AT IV hingegen die naturnahen biologischen Reinigungsverfahren (TKA, PKA). Ausgeglichen ist die Anzahl aufgrund der geringen Anlagenzahl bei AT II. In Anbetracht der Organisationsstrukturen und den daraus entstehenden Konflikten bei der Maßnahmenrealisierung als auch des vorhandenen Anlagenbestands und der Standortlage, wurden AT III und AT IV für eine detailliertere Betrachtung der kombinierten Anpassungsmaßnahmen ausgewählt.

Zur Bestimmung eines der beiden vorausgewählten Aufgabenträger für die detaillierte Analyse der Maßnahmeneffekte einer *Fusion* oder *Kooperation* und die Kombination mit den beiden anderen Anpassungsmaßnahmen, wurden diese Variationen unter den Rahmenbedingungen des Realszenarios (Sz II) bei einem Kostenanteil von 100 % simuliert und die Ergebnisse, bezogen auf das Jahr 2050 (siehe Tabelle 9-13), miteinander verglichen.

**Tabelle 9-13:** Einsparpotentiale bei Kombination von Anpassungsmaßnahmen zum Zeitpunkt der vollständigen Maßnahmenumsetzung für AT III und AT IV

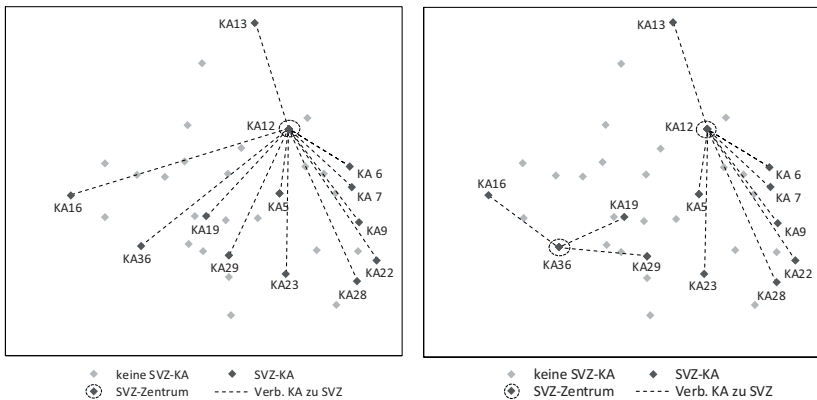
	SVZ		Zen
	1 Zentrum	2 Zentren	K <sub>A,100</sub>
Fu-AT III	-269 T€ a <sup>-1</sup>	-	-
Fu-AT IV	-338 T€ a <sup>-1</sup>	-7 T€ a <sup>-1</sup>	-17 T€ a <sup>-1</sup>

Bei der Simulation der kombinierten Anpassungsmaßnahmen *Fusion* und *SVZ* wurden die vorhandenen Infrastrukturen der Aufgabenträger berücksichtigt. Der Ergebnisvergleich zwischen AT III und AT IV zeigt, dass mit zwei Zentren, eine Konzeptrealisierung nur bei AT IV zu zusätzlichen Einsparungen (7 T€ a<sup>-1</sup>) führen würde. Durch das Vorhandensein eines *SVZ* bei AT IV führt eine Konzeptlösung mit einem Zentrum zu geringeren Investitionskosten, weshalb eine Übertragung des Konzeptes auf beide Aufgabenträger zu Synergien führen würde. Mit 338 T€ a<sup>-1</sup> ist das Einsparpotential bei AT IV höher als bei AT III mit 269 T€ a<sup>-1</sup>. Synergien und Einsparpotentiale bei der Kombination mit der Anpassungsmaßnahme *Zentralisierung* ergäben sich nur bei AT IV mit 17 T€. Die Ergebnisse, legen die Auswahl der detaillierten Untersuchungen der Anpassungsmaßnahme *Fusion* sowie die Kombinationen mit den Anpassungsmaßnahmen *Zentralisierung* und *SVZ*, auf AT IV nahe.

#### 9.4.1 Kombination von Zusammenschluss und Schlammverwertungszentren

Für das *SVZ*-Konzept erfolgte, in Bezug auf den gemeinschaftlichen Anlagenbestand (für AT IV siehe Anhang 21), eine Voruntersuchung mit einem Zentrum als auch mit zwei Zentren (siehe Tabelle 9-13). Aufgrund der höheren Kosten für den Bau und Betrieb einer zweiten Anlage im Entsorgungsgebiet von AT IV führt diese Konzeptvariante zu einem um 381 T€ geringerem Einsparpotential als der Ausbau der bereits vorhandenen Faulgasnutzungsanlage vom betrachteten Aufgabenträger. Eine grafische Übersicht beider *SVZ*-Konzepte ist in Abbildung 9-4 ersichtlich.





**Abbildung 9-4:** Konzeptvarianten bei einem Zusammenschluss von AT IV und Kombination der Anpassungsmaßnahme SVZ mit einem Zentrum (links) und zwei Zentren (rechts)

Die Konzeptvariante mit einem *SVZ* sieht vor, dass alle zusätzlichen Schlämme der KA mit technischen biologischen Reinigungsverfahren von AT IV mit  $5.842 \text{ kg TS d}^{-1}$  zu KA 12 transportiert werden. Bei Vorhandensein eines Co-Substratanteils wird zu Gunsten des energiereicheren Klärschlammes dieser reduziert. Bezogen auf den Anteil an Co-Substraten betreffend KA 12, reicht das zur Verfügung stehende Volumen in Sz II und Sz III aus, um die *Klärschlammengen* aufzunehmen. Dadurch entstehen bei dieser Konzeptvariante keine zusätzlichen Investitionskosten. In Sz I würde bei der Reinvestition in 2026 ( $n=13$ ) ein Ausbau, bedingt durch die zusätzlichen Mengen, erfolgen. Die zusätzlichen Investitionskosten würden 854 T€ betragen. Bei der Variante mit zwei *SVZ*, werden in Abhängigkeit ihrer Lage zum jeweiligen Zentrum, die Klärschlämme von KA 16, 19 und 29 zur KA 36 transportiert. Insgesamt würden im *SVZ* der KA 36 *Schlammengen* von  $5.500 \text{ kg TS d}^{-1}$  behandelt werden. Die Klärschlämme von KA 22, 23 und 28 werden auch bei dieser Konzeptvariante vom *SVZ* der KA 12 behandelt. Der Bau des neuen *SVZ* der KA 36 würde Investitionskosten von 2,97 Mio. € bedeuten.

Die Energiebilanz beider Konzeptvarianten sowie weitere technische und daraus ableitbare monetäre Parameter sind in Tabelle 9-14 enthalten.

**Tabelle 9-14:** Veränderung der prozessbasierten Parameter sowie resultierende Kosten in 2050 bei Fu-SVZ mit einem Zentrum und mit zwei Zentren

Parameter- bezeichnung	Einheit	1 SVZ			2 SVZ		
		Sz I	Sz II	Sz III	Sz I	Sz II	Sz III
Q <sub>SW,a</sub>	(m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> )	4.239.954	3.546.934	2.846.724	4.239.954	3.546.934	2.846.724
ΔE <sub>el</sub>	(Mwh a <sup>-1</sup> )	1,4	1,1	0,9	1,4	1,1	0,9
E <sub>el,Verbr</sub>	(Mwh a <sup>-1</sup> )	0	0	0	1,2	0,9	0,8
EP <sub>En,el</sub>	(T€)	0	0	0	181	248	291
E <sub>el,NE</sub>	(Mwh a <sup>-1</sup> )	1,4	1,1	0,9	0,09	0,07	0,06
Er <sub>el,NE</sub>	(T€)	326	261	217	22	18	15
ΔV <sub>S,a</sub>	(m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> )	-3.303	-2.647	-2.198	-3.303	-2.647	-2.198
EP <sub>S,Red</sub>	(T€)	56	77	91	56	77	91

Q<sub>SW,a</sub>: Jahresschmutzwassermenge, ΔE<sub>el</sub>: Diff. elektr. Energieverbrauch, E<sub>el,Verbr</sub>: Elektr. Energieverbrauch, EP<sub>En,el</sub>: Einsparpotential elektr. Energiekosten, E<sub>el,NE</sub>: Netzeinspeisung elektr. Energie, Er<sub>el,NE</sub>: Ertrag aus Netzeinspeisung, ΔV<sub>S,a</sub>: Vol.-Reduktion Jahresklärschlammmenge, EP<sub>S,Red</sub>: Einsparpotential Schlammentsorgungskosten

Die zusätzlich erzeugten Energiemengen sind in beiden Konzepten bezüglich gleicher Substratmengen äquivalent. Beim Konzept mit einem Zentrum wird, da die bereits vorhandene Anlage nahezu 100 % des Energiebedarfs durch Eigenstromversorgung deckt, die gesamte jährlich zusätzlich erzeugte Energie von 0,90 MWh (Sz III) bis 1,35 MWh (Sz I) ins Netz eingespeist. Die Differenz von 2,1 MWh bis 2,4 MWh zwischen erzeugter und eingespeister elektr. Energie resultiert aus dem zusätzlichen Energiebedarf für Pumpen und Rührwerk. Durch den Verkauf der elektrischen Energie würde ein Ertrag von 52 T€ a<sup>-1</sup> (Sz III) bis 326 T€ a<sup>-1</sup> (Sz I) erwirtschaftet werden. Bei der anaeroben Schlammfäulung reduziert sich bei beiden Konzeptvarianten die Schlammmenge um 2.198 m<sup>3</sup>a<sup>-1</sup> bis 3.303 m<sup>3</sup>a<sup>-1</sup>. Dies führt zu einer Reduzierung der Schlammentsorgungskosten von 56 T€a<sup>-1</sup> bis 91 T€a<sup>-1</sup>. Beim Konzept mit einem weiteren SVZ bei KA 36, werden 1,2 MWh von der erzeugten elektrischen Energie zur Eigenstromversorgung verwendet. Dies entspricht 100 % dem Energiebedarf von KA 36 und führt zu einer Einsparung von 181 T€ a<sup>-1</sup> (Sz I) bis 291 T€ a<sup>-1</sup> (Sz III). Die restliche Energie, abzüglich des zusätzlichen Energiebedarfs für die Pumpen und das Rührwerk des Faulturms, wird in das Stromnetz eingespeist und mit 15 T€ a<sup>-1</sup> bis 22 T€ a<sup>-1</sup> vergütet. Im Vergleich zum Konzept mit einem Zentrum ist das Einsparpotential in Hinblick auf die Betriebsstoffe beim Konzept mit zwei Zentren in Sz II und Sz III zwischen 4 T€ a<sup>-1</sup> bis 254 T€ a<sup>-1</sup> höher. Das höhere Einsparpotential in den beiden Szenarien beruht auf der Differenz zwischen dem Strompreis und der Netzeinspeisevergütung. In Sz I ist der Betrag der Netzeinspeisevergütung mit 23,14 ct kWh<sup>-1</sup> höher als der Strompreis mit 17 ct kWh. Dieses Verhältnis verändert sich auch nicht über den Betrachtungszeitraum in Sz I. Durch die Inflationsrate in Sz II und Sz III verändert sich dieses Verhältnis, wodurch die Eigenbedarfsdeckung wirtschaftlicher wird.

Die Einsparungen sowie Mehraufwände beider Konzeptvarianten sind je nach Investitionskostenanteil in Tabelle 9-15 den Kostenarten zugeordnet und beziehen sich nur auf die Umsetzung des SVZ-Konzeptes im Gebiet beider Aufgabenträger und enthalten nicht die Kostenveränderungen, welche sich durch den Zusammenschluss ergeben.

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

**Tabelle 9-15:** Veränderungen in den Kostenarten in 2050 bei Fu-SVZ mit einem Zentrum und mit zwei Zentren

Parameter- bezeichnung	Einheit	$K_{Ai}$	1 SVZ			2 SVZ		
			Sz I	Sz II	Sz III	Sz I	Sz II	Sz III
$\Delta K_P$	(T€)	-	0	0	0	0	0	0
$\Delta K_B$	(T€)	-	-326	-261	-217	-204	-266	-306
$\Delta K_L$	(T€)	-	-56	-77	-91	-19	-26	-30
$\Delta K_Z$	(T€)	100	0	0	0	0	85	185
		60					51	123
$\Delta K_A$	(T€)	100	81	0	0	149	199	218
		60				89	119	145
$EP_{Ges}$	(T€)	100	-301	-338	-308	-74	-8	66
		60				-133	-121	-68
$\Delta G_{MG,Fu}$	(€ m <sup>-3</sup> )	100	-0,07	-0,10	-0,11	-0,02	0,00	0,02
		60				-0,03	-0,03	-0,02
$\Delta G_{MG,Ko}$	(€ m <sup>-3</sup> )	100	-0,12	-0,12	-0,13	-0,03	0,00	0,03
		60				-0,04	-0,05	-0,03

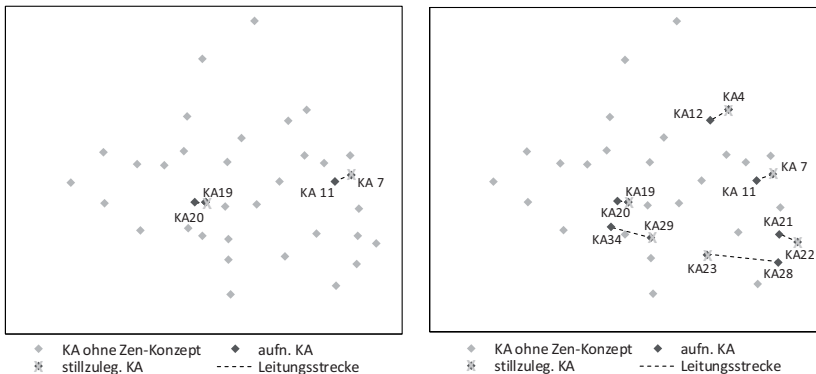
$\Delta$ : Differenz in den Kostenarten,  $K_P$ : Personalkosten,  $K_B$ : Betriebsstoffe,  $K_L$ : Bezogene Leistungen,  $K_Z$ : Zinsenkosten,  $K_A$ : Abschreibung,  $EP_{Ges}$ : Einsparpotential,  $G_{MG,Fu}$ : Mengengebühren bei Fusion,  $\Delta G_{MG,Ko}$ : Mengengebühren bei Kooperation

Für die Betreibung des *SVZ* werden im Modell keine zusätzlichen *Personalkosten* einkalkuliert. Die Einsparungen bei den *Betriebsstoffen* bestehen beim Konzept mit einem *SVZ* ausschließlich aus dem Ertrag durch die Vergütung der Netzeinspeisung. Beim Konzept mit zwei *SVZ* setzt sich diese Einsparung zusammen aus der Deckung des *Energiebedarfs* durch die Eigenstromversorgung und der Vergütung der restlichen nicht genutzten elektrischen Energie. Bei den *bezogenen Leistungen* resultieren die Einsparungen aus der Minderung der Schlammmentsorgungskosten. *Zinsaufwände* entstehen lediglich beim Konzept mit zwei *SVZ* in Sz II und Sz III und betragen 85 T€ a<sup>-1</sup> bis 185 T€ a<sup>-1</sup>. Aufgrund der zusätzlichen Investition zur Erweiterung der bestehenden Anlage in Sz I der Konzeptvariante mit einem *SVZ* entstehen *Abschreibungen* von 81 T€ a<sup>-1</sup>. Bei der Konzeptvariante mit zwei *SVZ* entstehen hingegen nur Investitionskosten für die Errichtung des zweiten *SVZ*. Daraus folgen *Abschreibungen* in den Szenarien von 149 T€ a<sup>-1</sup> (Sz I) bis 218 T€ a<sup>-1</sup> (Sz III). Insgesamt könnten beim Konzept mit dem vorhandenen *SVZ* zusätzlich 301 T€ a<sup>-1</sup> (Sz I) bis 338 T€ a<sup>-1</sup> (Sz II) eingespart werden. Für den *fusionierten* neuen Aufgabenträger würde es eine Reduzierung der Mengengebühr von 0,07 € m<sup>-3</sup> bis 0,11 € m<sup>-3</sup> und für den betrachteten Aufgabenträger bei einer *Kooperation* (EW-anteilig) von 0,12 € m<sup>-3</sup> bis 0,13 € m<sup>-3</sup> bedeuten. Durch den Bau eines zweiten *SVZ* führt dieses Konzept bei Sz I und Sz II zu Einsparungen von 8 T€ a<sup>-1</sup> (Sz II) bis 74 T€ a<sup>-1</sup> (Sz I). Für den *fusionierten* Aufgabenträger würde sich eine Reduzierung der Mengengebühr von 0,00 € m<sup>-3</sup> bis 0,03 € m<sup>-3</sup> und für den betrachteten Aufgabenträger bei einer *Kooperation* von 0,00 € m<sup>-3</sup> bis 0,05 € m<sup>-3</sup>. In Sz III resultiert ein Mehraufwand von 66 T€ a<sup>-1</sup> durch höhere *Zinsaufwände* und *Abschreibungen* und würde zu einer Erhöhung der Mengengebühr, je nach Art des *Zusammenschlusses* von 0,02 € m<sup>-3</sup> (Fu) bis 0,03 € m<sup>-3</sup> (Ko) führen.

### 9.4.2 Kombination von Fusionierung und Zentralisierung

Für die Untersuchung der Anpassungsmaßnahmenkombination einer *Fusionierung* des betrachteten Aufgabenträgers mit AT IV und der Schaffung von Synergien durch mögliche weitere *Zentralisierungen* von KA-Standorten erfolgten Modellrechnungen mit vollem Kostenansatz und mit 60 %-Kostenansatz für alle drei Szenarien.

In Abbildung 9-5 sind, die sich unter den Rahmenbedingungen von Sz I ergebenden *Zentralisierungskonzepte* bei vollem Kostenansatz (links) und bei 60 % (rechts), abgebildet



**Abbildung 9-5:** Zentralisierungskonzepte bei Zusammenschluss mit AT IV bei einem Investitions-kostenanteil von 100 % (links) und 60 % (rechts)

Bei vollem Kostenansatz würde, neben der Stilllegung von KA 7 mit Überleitung nach KA 11 (siehe Kap. 9.2), nur eine weitere Überleitung von KA 19 nach KA 20 (beide KA gehören zum Anlagenbestand von AT IV) nach dem *Zusammenschluss* der beiden Aufgabenträger resultieren (Abbildung 9-5, links). Beträgt der Kostenanteil 60 % werden, neben den genannten, vier weitere KA stillgelegt und übergeleitet. Darin enthalten ist die Stilllegung von KA 4 mit der Überleitung nach KA 12, welche ebenfalls im Konzeptvorschlag bei den *Zentralisierungsoptionen* des betrachteten Aufgabenträgers enthalten ist. Zusätzlich würden KA 22, KA 23 und KA 29 stillgelegt und nach KA 21, KA 28 und KA 34 übergeleitet werden. In Sz II würde bei vollem Kostenansatz nur KA 19 stillgelegt und nach KA 20 übergeleitet werden. Bei einem Kostenanteil von 60 % ergäbe sich in Sz II als auch in Sz III das gleiche Konzept wie bei Sz I nur ohne die Stilllegung von KA 29 und entsprechende Überleitung nach KA 34. Für Sz III ergäben sich bei vollem Kostenansatz keine Einsparpotentiale durch *Zentralisierungsmaßnahmen*. Eine ausführliche Übersicht der beteiligten KA in den Konzepten für die einzelnen Szenarien ist in Anhang 22 ersichtlich.

Wesentliche Standortcharakteristika für die Bestimmung der Stilllegungen und Überleitungen der *Zentralisierungskonzepte* sind für die Modellbetrachtung neben der Standortlage, die nominale Belastung der stillzulegenden KA und die noch zur Verfügung stehende Kapazität der aufnehmenden

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

KA. Als Überblick sind in Tabelle 9-16 die in den *Zentralisierungskonzepten* vorzufindenden KA mit Ausbaugröße, gegenwärtigen nominellen Belastungen und der bei einer Überleitung resultierenden restlichen Kapazität der aufnehmenden KA aufgezeigt.

**Tabelle 9-16:** Standortcharakteristika der stillzulegenden und der aufnehmenden KA

Stillzulegende KA				Aufnehmende KA				Kap <sub>Rest</sub> (%)
KA	EW	Nom EW	Typ	KA	EW	Nom EW	Typ	
4	1.550	1.872	TKA <sub>ub</sub>	12	200.000	168.000	BB <sub>anaerob</sub>	-30
7	180	233	BB	11	1.000	738	TKA <sub>ub</sub>	29
19	300	150	BB	20	300	179	TKA <sub>ub</sub>	29
22	400	158	RTK	21	220	25	TKA <sub>ub</sub>	-37
23	2.100	1.602	RTK	28	3.000	1.343	BB	-55
29	1.400	597	BB	34	620	38	TKA <sub>ub</sub>	15

EW: Einwohnerwerte, Nom EW: Nominale Einwohnerwerte, Kap<sub>Rest</sub>: Restkapazität der KA, BB: Belebtschlammverfahren, BB<sub>anaerob</sub>: Belebtschlammverfahren mit anaeroben Schlammstabilisierung, RTK: Rotationstauchkörper, TKA<sub>ub</sub>: Teichkläranlage (unbelüftet)

Im *Zentralisierungskonzept* gehören alle stillzulegenden KA der GK 1 an und besitzen, bis auf eine, nur technische biologische Reinigungsverfahren (BB, RTK). Da unbelüftete TKA gemäß den Modellannahmen keiner elektrischen Energie bedürfen, begünstigt dies die Auswahl als aufnehmende Anlage. In Anbetracht dessen sind vier der sechs aufnehmenden Anlagen TKA. Des Weiteren sind bei drei Anlagen (KA 12, KA 21, KA 28) ausreichende restliche Kapazitäten vorhanden, um die aktuelle nominale Belastung der stillzulegenden KA aufzunehmen. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass keine zusätzlichen Investitionen für einen Ausbau der aufnehmenden KA notwendig sind. Dies würde nicht auf die Überleitungen der anderen drei KA (KA 11, KA 20, KA 34) zutreffen.

Die Einsparungen und Mehraufwände der *Zentralisierungskonzepte* in den drei Szenarien für das Jahr 2050 sind für die Kostenarten und die resultierenden Mengengebührenveränderungen in Tabelle 9-17 zusammengefasst. Nicht enthalten sind dabei die Kostenveränderungen, welche sich durch den *Zusammenschluss* ergeben. In Tabelle 9-18 sind die aus den technischen Parametern ableitbaren Kosten für die jeweiligen Szenarien und Kostenanteile in 2050 wiedergegeben. Diese Kosten sind den Kostenarten *Betriebsstoffe* und *bezogene Leistungen* zu zuordnen.

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

**Tabelle 9-17:** Einsparungen und Mehraufwände der Zentralisierungskonzepte in den Kostenarten sowie Veränderung der Gesamtkosten und Mengengebühr

Kostenart	K <sub>A</sub>	Sz I	Sz II	Sz III
ΔK <sub>P</sub> (T€)	100	-5,5	-6,3	-
	60	8,5	26,2	36,6
ΔK <sub>B</sub> (T€)	100	-4,8	-3,2	-
	60	-26,2	-29,8	-39,4
ΔK <sub>L</sub> (T€)	100	0,2	0,1	-
	60	0,2	0,5	0,7
ΔK <sub>Z</sub> (T€)	100	0	3,1	-
	60		-13,0	-66,2
ΔK <sub>A</sub> (T€)	100	8,8	-11,1	-
	60	16,9	-140,0	-309,4
ΔEP <sub>Ges</sub> (T€)	100	-1,2	-17,4	-
	60	-0,5	-156,0	-377,7
ΔG <sub>MG,Fu</sub> (€ m <sup>-3</sup> )	100	0,00	0,00	-
	60	0,00	-0,04	-0,13
ΔG <sub>MG,Ko</sub> (€ m <sup>-3</sup> )	100	0,00	-0,01	-
	60	0,00	-0,09	-0,28

Graue Einfärbung: Umsetzung unwahrscheinlich, Δ: Differenz in Bezug auf Einsparungen und Mehraufwände, K<sub>P</sub>: Personalkosten, K<sub>B</sub>: Betriebsstoffe, K<sub>L</sub>: bezogene Leistungen, K<sub>Z</sub>: Zinsen, K<sub>A</sub>: Abschreibung, EP<sub>Ges</sub>: Einsparpotential, G<sub>MG,Fu</sub>: Mengengebühr bei Fusion, G<sub>MG,Ko</sub>: Mengengebühr bei Kooperation, K<sub>Kan,Rep</sub>: Kanalreparaturkosten, K<sub>KSE</sub>: Schlammmentsorgungskosten, K<sub>En</sub>: Energiekosten, K<sub>Lab</sub>: Laboranalysenkosten

**Tabelle 9-18:** Einsparungen und Mehraufwände der Zentralisierungskonzepte bei den Betriebskosten

Kosten	K <sub>A</sub>	Sz I	Sz II	Sz III
ΔK <sub>Kan,Rep</sub> (T€)	100	0,2	0,1	-
	60	0,4	0,5	0,7
ΔK <sub>KSE</sub> (T€)	100	0	0	-
	60	-0,3	0	0
ΔK <sub>En</sub> (T€)	100	-3,4	-3,2	-
	60	-17,1	-25,2	-32,0
ΔK <sub>Lab</sub> (T€)	100	-1,4	-0,7	-
	60	-9,1	-4,6	-7,4

Bei vollem Kostenansatz würden, bei Betrachtung der Anlagenbestände beider Aufgabenträger, für Sz I und Sz II *Zentralisierungskonzepte* mit Einsparpotentialen hervorgehen. Für Sz III würde kein Konzept mit Einsparungen resultieren. Während es in den Konzepten bei vollem Kostenansatz zu *Personalkosteneinsparungen* von 5 T€ a<sup>-1</sup> bis 6 T€ a<sup>-1</sup> käme, würde bei einem Kostenanteil von 60 %, aufgrund des Kapazitätsausbaus und des damit verbundenen höheren Aufwands bei der Selbstüberwachung nach SÜVO, ein *Personalkostenmehraufwand* von 9 T€ a<sup>-1</sup> bis 37 € a<sup>-1</sup> resultieren. Die Einsparungen bei den *Betriebsstoffen* ergeben sich aus der Reduzierung der Energiekosten sowie den Laboranalysekosten und betragen für die Szenarien von 3 T€ a<sup>-1</sup> bis 5 T€ a<sup>-1</sup> bei vollem Kostenansatz und von 26 T€ a<sup>-1</sup> bis 39 T€ a<sup>-1</sup> bei einem Kostenanteil von 60 %. Zur Ermittlung der Kosteneffekte in der Kostenart *bezogene Leistungen* werden für diese Anpassungsmaßnahme die zusätzlich entstehenden Kosten für Kanalreparaturen mit den Einsparungen bei der Klärschlammmentsorgung verrechnet. *Zinskostenveränderungen* ergeben sich nur in Sz II und Sz III. Da beim *Zentralisierungskonzept*, welches bei vollem Kostenansatz resultiert, die Investitionskosten der Überleitung höher sind als die Einsparung der Reinvestitionskosten für die KA, würden in diesem Fall *Zinskostenmehraufwände* von 3 T€ a<sup>-1</sup> entstehen. Eine Minderung der *Zinskosten* von 13 T€ a<sup>-1</sup> bis 66 T€ a<sup>-1</sup> würde bei einem Kostenanteil von 60 % und den daraus resultierenden *Zentralisierungskonzepten* erfolgen. Aufgrund der Differenzen zwischen Investitions- und Reinvestitionskosten, die sich aus Stilllegungen und Überleitungen der KA in den *Zentralisierungskonzepten* ergeben, entstehen Mehraufwände bei den *Abschreibungen* ausschließlich in Sz I, welche 9 T€ a<sup>-1</sup> bis 17 T€ a<sup>-1</sup> betragen. Dagegen kommt es in Sz II zur Reduzierung der *Abschreibungen* von 11 T€ a<sup>-1</sup> (K<sub>A</sub>=100 %) bis 140 T€ a<sup>-1</sup> (K<sub>A</sub>=60 %) und in Sz III bis 309 T€ a<sup>-1</sup> (K<sub>A</sub>=60 %). Das Gesamteinsparpotential beträgt für Sz I von 0,5 T€ a<sup>-1</sup> bis

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

1 T€ a<sup>-1</sup>, in Sz II von 17 T€ a<sup>-1</sup> bis 156 T€ a<sup>-1</sup> und in Sz III bis 378 T€ a<sup>-1</sup>. Für die Entwicklung der Mengengebühren würde dies bedeuten, dass es bei vollem Kostenansatz zu keiner Veränderung der Mengengebühr des *fusionierten* Aufgabenträgers als Resultat der *Zentralisierungen* kommen würde. Bei einem Kostenanteil von 60 % würde sich hingegen die Mengengebühr um 0,04 € m<sup>-3</sup> (Sz I) bis 0,13 € m<sup>-3</sup> (Sz III) reduzieren. Die Betrachtung der resultierenden Mengengebührenveränderungen bei einer *Kooperation* zwischen den beiden Aufgabenträgern ist rein hypothetisch, weshalb diese grau hervorgehoben sind. Doch würden diese Kostensenkungen EW-anteilig auf die Aufgabenträger übertragen werden, so hätte dies bei vollem Kostenansatz eine Minderung der Mengengebühr beim betrachteten Aufgabenträger von 0,01 € m<sup>-3</sup> und bei einem Kostenanteil von 60 % von 0,09 € m<sup>-3</sup> (Sz II) bis 0,28 € m<sup>-3</sup> (Sz III) zur Folge. Allerdings sind Überleitungen zu externen, außerhalb des Verbandsgebietes liegenden KA nicht gängig und eher selten.

### 9.5 Zusammenfassende Betrachtung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

Als Ergebnisanalyse findet eine Gegenüberstellung der Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Einsparpotentiale und resultierenden Mengengebührenveränderungen in Tabelle 9-19 statt.

**Tabelle 9-19:** Einsparpotentiale der Anpassungsmaßnahmen bei den Gesamtkosten und Mengengebühren

Anpassungs- maßnahme	Einheit	2015			2050		
		Sz I	Sz II	Sz III	Sz I	Sz II	Sz III
SVZ	(T€)	-174/-220	-120/-186	-51/-153	-174/-220	-59/-146	-/-66
	(€ m <sup>-3</sup> )	-0,14/-0,18	-0,10/-0,15	-0,05/-0,13	-0,13/-0,16	-0,06/-0,15	-/-0,09
Zen	(T€)	0/0	-/0	-/-	-3/-5	-/3	-/-
	(€ m <sup>-3</sup> )	0,00/0,00	-/0,00	-/-	0,00/0,00	-/0,00	-/-
Ko	(T€)	-279	-300	-314	-279	-505	-744
	(€ m <sup>-3</sup> )	-0,23	-0,25	-0,26	-0,21	-0,51	-1,03
Ko-SVZ	(T€)	-486/-486	-506	-519	-442/-459	-688	-911
	(€ m <sup>-3</sup> )	-0,40/-0,40	-0,38	-0,38	-0,33/-0,32	-0,63	-1,16
Fu	(T€)	-548	-532	-529	-548	-896	-1.263
	(€ m <sup>-3</sup> )	-0,13	-0,13	-0,12	-0,12	-0,24	-0,38
Fu-SVZ	(T€)	-931/-931	-914	-909	-849/-882	-1.235	-1.571
	(€ m <sup>-3</sup> )	-0,22/-0,22	-0,22	-0,21	-0,19/-0,19	-0,34	-0,49
Fu-Zen	(T€)	-548/-548	-532/-532	-529/-529	-550/-549	-914/-1.052	-1.263/-1.685
	(€ m <sup>-3</sup> )	-0,13/-0,13	-0,13/-0,13	-0,12/-0,12	-0,12/-0,12	-0,24/-0,28	-0,38/-0,53

Dunkelgraue Einfärbung: keine Umsetzung der Maßnahme möglich, hellgraue Einfärbung: Betrachtung aus Sicht des neugebildeten Aufgabenträgers, SVZ: Schlammverwertungszentrum, Zen: Zentralisierung, Ko: Kooperation, Ko-SVZ: Kombination von Ko und SVZ, Fu: Fusionierung, Fu-SVZ: Kombination von Fu und SVZ, Fu-Zen: Kombination aus Fu und Zen

In Tabelle 9-19 sind jeweils die Einsparpotentiale sowie die daraus resultierenden Minderungen der Mengengebühr bei einem Kostenanteil von 100 % (voranstehend) und 60 % (nachstehend) enthalten. Bei den Anpassungsmaßnahmen *Fusion* und *Kooperation* ist, aufgrund nicht erforderlicher Investitionen für diese Maßnahmen und somit entfallender Kostenanteile, für jedes Szenario nur ein Wert angegeben. In Analogie dazu ist ebenfalls nur ein Wert bei *Fu-SVZ* und *Ko-SVZ* in Sz I angegeben, denn aufgrund der zur Verfügung stehenden Kapazitäten in den Faulbehältern sind bei der Konzeptvariante mit einem *SVZ* in Sz II und Sz III keine zusätzlichen Investitionen für einen Ausbau

zu tätigen. Die dunkelgraue Hervorhebung der Zeile von *SVZ* kennzeichnet, dass diese Anpassungsmaßnahme aufgrund der bereits bestehenden Faulgasverwertungsanlage außer Betracht steht. Dieses hypothetische Einsparpotential ist jedoch aufgrund seiner Größenordnung dennoch aufgeführt. Hellgrau hervorgehoben ist die Anpassungsmaßnahme *Fusion* sowie die Kombinationen mit beiden infrastrukturellen Anpassungsmaßnahmen (*SVZ, Zen*) zur Kennzeichnung der Einsparpotentiale und Mengengebührenminderungen des durch die *Fusion* neugebildeten Aufgabenträgers. Diese Einsparungen und Minderungen sind nicht auf den betrachteten Aufgabenträger zu beziehen.

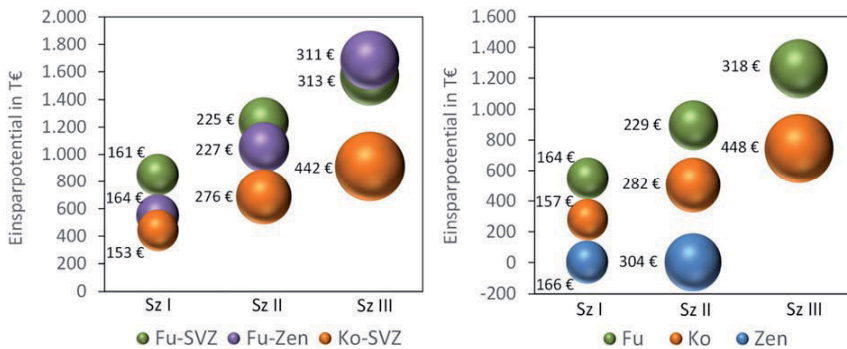
Beim direkten Vergleich der infrastrukturellen Anpassungsmaßnahmen wäre, unter den Rahmenbedingungen der drei Szenarien, mit dem *SVZ*-Konzept (mit einem Zentrum) ein höheres Einsparpotential als mit den *Zentralisierungskonzepten* zu erzielen. Die Einsparungen der *Zentralisierungskonzepte* sind zu gering, um einen Effekt auf die Gebühren zu bewirken. Des Weiteren würden bei vollem Kostenansatz für Sz II und Sz III keine *Zentralisierungen* hinsichtlich derer Ökonomie erfolgen. Auch bei einem Kostenanteil von 60 % käme es in Sz III nicht zur Konzeptumsetzung. Anders verhält es sich bei den *SVZ*-Konzepten, bei denen nur in Sz III bei vollem Kostenansatz, keine Einsparungen zu erwarten wären.

Die größten Einsparpotentiale der untersuchten Anpassungsmaßnahmen resultieren aus den *Zusammenschlüssen*. Die Synergieeffekte beim Einkauf und durch die Zusammenlegung der Verwaltung würden bei einer *Kooperation* bis zum Jahr 2050 eine Reduzierung der Mengengebühr beim betrachteten Aufgabenträger von  $0,21 \text{ € m}^{-3}$  bis  $1,03 \text{ € m}^{-3}$  und bei einer *Fusion* für den neuen Aufgabenträger von  $0,12 \text{ € m}^{-3}$  bis  $0,38 \text{ € m}^{-3}$  nach sich ziehen. Durch die Kombinationen mit den infrastrukturellen Anpassungsmaßnahmen lassen sich die Einsparpotentiale zusätzlich erhöhen. Hinsichtlich der konzipierten *Zentralisierungskonzepte* kommt für die Anpassungsmaßnahme *Kooperation* nur die Kombination mit der Anpassungsmaßnahme *SVZ* in Betracht. Durch die Kombination dieser Maßnahmen werden durch die infrastrukturellen Synergieeffekte größere Einsparpotentiale generiert, es wäre ein Einsparpotential von  $486 \text{ T€ a}^{-1}$  bis  $519 \text{ T€ a}^{-1}$  in 2015 und von  $442 \text{ T€ a}^{-1}$  bis  $911 \text{ T€ a}^{-1}$  in 2050 unter den getroffenen Annahmen realisierbar. Dies würde eine Reduzierung der Mengengebühr von  $0,32 \text{ € m}^{-3}$  bis  $1,16 \text{ € m}^{-3}$  in 2050 bedeuten. Bei der Anpassungsmaßnahme *Fusion* wurden die Kombinationen mit beiden infrastrukturellen Anpassungsmaßnahmen untersucht. Die Kombination mit der Anpassungsmaßnahme *Zentralisierung* führt bei vollem Kostenansatz nur zu einer geringfügigen Steigerung des Einsparpotentials, welches in 2050  $550 \text{ T€ a}^{-1}$  bis  $1.263 \text{ T€ a}^{-1}$  beträgt. Von dieser Summe entstammen maximal 0,4 % aus den *Zentralisierungskonzepten*. Gemäß der Annahme, dass durch regionale Baupreisunterschiede der Kostenanteil 60 % betragen könnte, würden durch die unter diesen Bedingungen vorgeschlagenen *Zentralisierungskonzepte* Einsparungen von  $549 \text{ T€ a}^{-1}$  bis  $1.685 \text{ T€ a}^{-1}$  resultieren. Dementsprechend würde sich dadurch das Einsparpotential um 33,4 % steigern lassen. Mit dieser Maßnahmenkombination gäbe es im Vergleich zur *Fusion* keine weitere Gebührenminderung in 2015. Bis 2050 ergäbe sich eine Reduzierung von  $0,12 \text{ € m}^{-3}$  bis  $0,52 \text{ € m}^{-3}$ . Mit der Kombination der Anpassungsmaßnahme *SVZ* würden sich zeitnah bereits zusätzliche Einsparungen ergeben, in der Summe würde diese  $931 \text{ T€ a}^{-1}$  in 2015 betragen und würde sich auf  $849 \text{ T€ a}^{-1}$  bis  $1.571 \text{ T€ a}^{-1}$  bis 2050 erhöhen. Durch die Kombination der beiden Anpassungsmaßnahmen würde sich das Einsparpotential zusätzlich um maximal 71,8 % (Sz II und Sz III) in 2015 und um 60,9 % (Sz I) in 2050 steigern lassen. Für die



Gebührenentwicklung bedeutet dies eine Reduzierung von  $0,21 \text{ € m}^{-3}$  bis  $0,22 \text{ € m}^{-3}$  in 2015 und  $0,19 \text{ € m}^{-3}$  bis  $0,49 \text{ € m}^{-3}$  in 2050.

Damit die Einsparpotentiale der Einzelmaßnahmen mit denen der Kombinationen bezüglich der unterschiedlichen kalkulatorischen Größen zur Mengengebührenberechnung (Jahresumsatz, Schmutzwassermenge) vergleichbar sind, wurden hierfür die PKB durch die SWE eines Standard ZPH in Abhängigkeit vom Wasserverbrauch, der Mengen- sowie Grundgebühr ermittelt und in Abbildung 9-6 im Zusammenhang mit den Einsparpotentialen vergleichend dargestellt. Für einen besseren Vergleich sind die Einzelmaßnahmen (links) und kombinierten Maßnahmen (rechts) separiert abgebildet. Im Hinblick auf regionale Unterschiede bei den Baupreisen wurden für den Vergleich in der Darstellung die Einsparpotentiale mit einem Kostenanteil 60 % herangezogen.

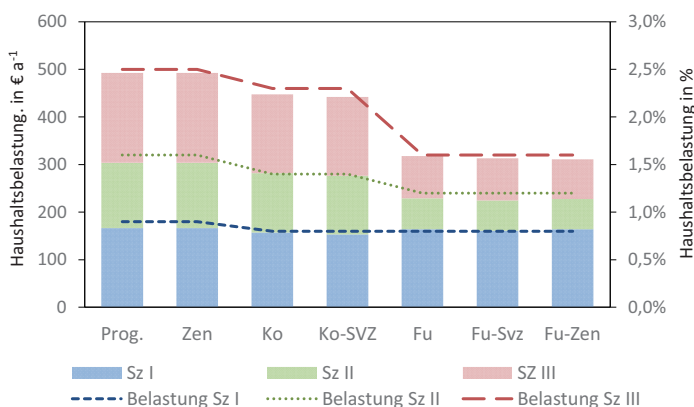


**Abbildung 9-6:** Jährliches Einsparpotential und resultierende Haushaltsbelastung in den Szenarien eines ZPH durch Einzelmaßnahmen (links) und Maßnahmenkombinationen (rechts)

Im Vergleich der PKB in einem ZPH würde eine *Kooperation* im Bereich der Verwaltung zwischen dem betrachteten Aufgabenträger und AT IV in Sz I bei den Einzelmaßnahmen die geringste Belastung mit  $157 \text{ € a}^{-1}$  in 2050 ergeben. Für Sz II und Sz III sind die Belastungen bei einer *Fusion* mit  $318 \text{ € a}^{-1}$  am geringsten. Damit ist die jährliche Belastung um  $130 \text{ € a}^{-1}$  geringer als bei einer *Kooperation* und um  $175 \text{ € a}^{-1}$  geringer als das Prognoseergebnis für den Fall, dass keine Anpassungsmaßnahmen erfolgen. Keine Belastungsveränderungen würden sich durch die *Zentralisierung* ergeben. Zumal für Sz III bezogen auf diese Anpassungsmaßnahme keine Konzepte mit Einsparpotentialen existieren (deshalb keine Darstellung in Abbildung 9-6 links). Die Haushaltsbelastungen bei den Maßnahmenkombinationen würden in Sz I bei der Kombination einer *Kooperation* in der Verwaltung und dem SVZ-Konzept (*Ko - SVZ*) mit  $153 \text{ € a}^{-1}$  in 2050 am geringsten ausfallen. Für Sz II würde dies mit  $225 \text{ € a}^{-1}$  für die Kombination einer *Fusion* mit dem SVZ-Konzept gelten. Mit einer jährlichen PKB von  $311 \text{ € a}^{-1}$  in Sz III und damit einer Minderung von  $182 \text{ € a}^{-1}$  im Vergleich zum Prognoseergebnis ohne Maßnahmen, würde mit der Kombination der *Fusion* mit dem vorgeschlagenen *Zentralisierungskonzept*, umgesetzt werden können. Mittels der Kombination einer *Fusion* mit dem SVZ-Konzept ließe sich die Belastung auf  $313 \text{ € a}^{-1}$  reduzieren. Eine Reduzierung von  $51 \text{ € a}^{-1}$  würde sich durch die

Variante der *Kooperation* mit dem *SVZ*-Konzept ergeben. Die resultierende Belastung im Jahr 2050 würde somit 442 € a<sup>-1</sup> betragen.

Zur Bewertung der relativen Haushaltsbelastungen für ein ZPH, welche für 2050 durch die ausgewählten Anpassungsmaßnahmen entstehen, sind diese je Szenario zusammen mit den absoluten Haushaltsbelastungen in Abbildung 9-7 aufgezeigt.



**Abbildung 9-7:** Anhand der Anpassungsmaßnahmen in den Szenarien resultierende absolute und relative prognostizierte Haushaltsbelastung in 2050 für einen ZPH

Unter Berücksichtigung der Nettogehaltsentwicklung für M-V betragen die relative PKB in einem ZPH in 2050 ohne Anpassungsmaßnahmen alleine für die SWE 2,5 % und 4,6 % für die SWW. Durch die Anpassungsmaßnahmen ist eine kaskadenförmige Abstufung der Belastung ersichtlich. Bei der Anpassungsmaßnahme *Zentralisierung* gäbe es keine Veränderung im Vergleich zu den Resultaten der Prognose. Jedoch würde sich mit der Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen *Kooperation* und die Kombination von der *Kooperation* mit dem *SVZ*-Konzept die PKB je nach Szenario um 0,1 % bis 0,2 % abmindern lassen. Für Sz I bis Sz III bedeutet dies eine Belastung für einen ZPH von 0,8 % bis 2,3 % nur für die SWE. Unter Berücksichtigung der pauschalen mittleren Belastung für die TWV und RWE ergäbe sich eine Gesamtbelastung durch die SWW von 1,7 bis 4,2 %. Damit wäre die Forderung der EBRD auch in Sz III mit einer Belastung kleiner 4 % nicht erfüllt. Mit der Anpassungsmaßnahme *Fusion* sowie den kombinierten Varianten *Fusion* mit dem *SVZ*-Konzept und dem *Zentralisierungskonzept*, würde sich die Belastung um 0,1 % bis 0,9 % verringern lassen, womit die Belastung durch die SWE 0,8 % bis 1,6 % und durch die SWW von 1,7 % bis 3,0 % betragen würde. Mit diesen Maßnahmen ließe sich die Belastung auch unter den Rahmenbedingungen von Sz III auf den ausgewiesenen Richtwert der OECD von 3 % senken und wäre somit in dem Bereich, welcher als vertretbar angesehen wird.

Zum Vergleich sind die absolute und relative PKB eines SH und ZPH in Tabelle 9-20 für die Anpassungsmaßnahmen in den einzelnen Szenarien für 2050 zusammengefasst. Im Sinne der

## 9. Quantifizierung der Anpassungsmaßnahmeneffekte

Ergebnisweiterführung wurden für die Berechnung der Belastungen auch in diesem Fall die Einsparpotentiale, welche sich bei einem Kostenanteil von 60 % ergeben, herangezogen. Die graue Kennzeichnung der Anpassungsmaßnahme *SVZ*, dient dem Hinweis, dass dieses Konzept, wegen bereits erfolgter Umsetzung, nicht mehr in Betracht kommt.

**Tabelle 9-20:** Absolute und relative Haushaltsbelastung für 2050 eines ZPH und SH in den Szenarien

Anpassungs- maßnahme	Einheit	ZPH			SH		
		Sz I	Sz II	Sz III	Sz I	Sz II	Sz III
SVZ	(€ a <sup>-1</sup> )	160/161	301/298	493/488	192/193	330/334	521/522
	(%)	-0,8	-1,6	-2,5	-1,0	-1,7	-2,7
Zen	(€ a <sup>-1</sup> )	166	304	493	199	336	525
	(%)	0,9	1,6	2,5	1,0	1,7	2,7
Ko	(€ a <sup>-1</sup> )	157	282	448	190	314	480
	(%)	0,8	1,4	2,3	1,0	1,6	2,4
Ko-SVZ	(€ a <sup>-1</sup> )	153	276	442	174	297	462
	(%)	0,8	1,4	2,3	0,9	1,5	2,4
Fu	(€ a <sup>-1</sup> )	164	229	318	190	255	344
	(%)	0,8	1,2	1,6	1,0	1,3	1,8
Fu-SVZ	(€ a <sup>-1</sup> )	161	225	313	187	251	339
	(%)	0,8	1,2	1,6	1,0	1,3	1,7
Fu-Zen	(€ a <sup>-1</sup> )	164	227	311	191	254	344
	(%)	0,8	1,2	1,6	1,0	1,3	1,7

Dunkelgraue Einfärbung: keine Umsetzung der Maßnahme möglich, SVZ: Schlammverwertungszentrum, Zen: Zentralisierung, Ko: Kooperation, Ko-SVZ: Kombination von Ko und SVZ, Fu: Fusionierung, Fu-SVZ: Kombination von Fu und SVZ, Fu-Zen: Kombination aus Fu und Zen

Die Differenz der relativen Haushaltsbelastung zwischen SH und ZPH beträgt je nach Szenario und Anpassungsmaßnahme 0,1 % bis 0,2 %. Folglich würde sich die Belastung eines SH durch die SWE gemäß den Annahmen für die Modellierung auf 1,0 % bis 2,7 % belaufen. Durch die Gesamtkosten der SWW ergäbe sich eine Gesamtbelastung für einen SH von 1,8 % bis 4,6 %. Eine Übersicht über die Gesamt- als auch über die relativen Belastungen für SH und ZPH durch die SWW ist in Anhang 23 zusammengetragen. Im Rahmen der OECD Kategorisierung hinsichtlich der Zumutbarkeit von Kosten, welche sich durch die SWW für die Haushalte ergeben, wären die Belastungen unter den Rahmenbedingungen von Sz I mit 1,8 % bis 1,9 % für die SH und mit 1,7 % bis 1,8 % bei den ZPH als auch in Sz II mit 2,4 % bis 3,1 % (SH) und 2,3 % bis 3,0 % (ZPH) als vertretbar anzusehen. Um eine geringere Belastung als 3 % des Nettoeinkommens für 2050, bei gegebenen Rahmenbedingungen wie in Sz III, zu erreichen, wären für beide Haushaltsformen die Umsetzung der Maßnahmenkombinationen *Fusion* mit *Zentralisierungskonzept* oder *Fusion* mit *SVZ-Konzept* erforderlich. Gemäß den Annahmen aus der statistischen Analyse der Rahmenparameter ist das Eintreten von Sz II am wahrscheinlichsten. Unter diesen Bedingungen ist ein Handeln in Form von Umsetzungen der vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich des OECD-Richtwerts nicht zwingend erforderlich. Doch könnte mit deren Umsetzung die PKB der Haushalte reduziert werden.

### 10. Zusammenfassung und Ausblick

#### 10.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit bestand in der Untersuchung der wirtschaftlich-technischen Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Schmutzwasserentsorgung als Teilbereich der Abwasserwirtschaft. Im Vordergrund der Betrachtung stand dabei die Gebührenentwicklung als Gradmaß für eine bezahlbare Abwasserwirtschaft im Hinblick auf die zukünftige Belastung der angeschlossenen Haushalte. Für die Untersuchung bedarf es einer ganzheitlichen Betrachtung des Aufgabenträgers. Dies beinhaltet die Berücksichtigung aller mit dem SWEN und den KA im Zusammenhang stehenden kostenrelevanten Prozesse sowie die Kosten der Verwaltung. Darauf bezogen wurde ein Modell zur ganzheitlichen und prozessbasierten Abbildung von Aufgabenträgern im Bereich der Schmutzwasserentsorgung entwickelt. Zur Beschreibung der wesentlichen Prozesse im Bereich des SWEN und der KA wurden in Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Daten Ansätze ausgewählt und in das Modell integriert. Der Aufbau des Modells erfolgte mit insgesamt drei Modulen. Die Ermittlung des Kanalnetzzustandes erfolgt im Modul *SWEN* mittels der Überlebensfunktionen nach Herz (1996, 1995). Anhand des Kanalzustandes und unter Berücksichtigung der Sanierungsquote werden die Instandhaltungskosten ermittelt. Im Modul *KA* werden die physikalischen und biochemischen Prozesse basierend auf der Bemessungsrichtlinie DWA-A-131 (2016) berechnet. Beide Module verfügen über ein Asset-Assessment mit dessen Unterstützung die Reinvestitionszeitpunkte bestimmt und anhand von Kostenfunktionen die Reinvestitionskosten ermittelt werden. Die prozessbasierten Informationen aus den Modulen *SWEN* und *KA* werden an das Modul *KGK* übergeben, in welchem sämtliche Kosten hergeleitet werden und einerseits die Abbildung der Kostenstruktur, andererseits die Kosten-, Beitrags und Gebührenermittlung erfolgt.

Für die beispielhafte Anwendung wurde ein Aufgabenträger aus M-V ausgewählt. Dieser wurde anhand von öffentlich zugänglichen Daten des LAiV-MV und LUNG sowie weiteren wirtschaftlichen und technischen Daten des Aufgabenträgers im Modell abgebildet. Nach erfolgter Parameteranpassung zur Optimierung der Modellgenauigkeit wurde anhand von historischen Daten des Aufgabenträgers von 2006 und den Daten von 2014 eine Modellvalidierung durchgeführt. Diese ergab, dass die simulierten Gesamtkosten lediglich eine Abweichung von -23 T€ haben. In den einzelnen Kostenarten betragen die Abweichungen zu den realen Kosten zwischen -2 % bis 5 %. Bezogen auf die Mengengebühr entspricht dies einer Abweichung von -0,4 % (-1 ct m<sup>-3</sup>). Die Genauigkeit des Modells in der Abbildung der Mengengebühr und Kostenstruktur wurde durch eine Parameteranpassung erzielt. Ohne eine vorherige Parameteranpassung beträgt die Abweichung bei den Gesamtkosten (707 T€) und bei der Mengengebühr 17,0 % (44 ct m<sup>-3</sup>).

Zur Untersuchung des Einflusses der als Eingangsgrößen des Modells ausgewählten Rahmenparameter (Bevölkerungsentwicklung, Wasserverbrauchsentwicklung der Haushalte, Inflationsrate und Kreditzinsrate) auf die Gebührenentwicklung wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierfür wurden die Rahmenparameter sowohl einzeln als auch überlagert betrachtet. Die Analyse ergab, dass die Veränderung der Bevölkerungszahl in einer Spanne von -30 % bis 30 % für den betrachteten Aufgabenträger eine Veränderung der Mengengebühr von -8 % (-26 ct m<sup>-3</sup>) bis 11 % (33 ct m<sup>-3</sup>)

bewirkt. In Kombination mit den anderen Rahmenparametern beträgt der Anteil der Gebühren-erhöhung durch die Bevölkerungsveränderung unter den Rahmenbedingungen des Realszenarios 9 % ( $37 \text{ ct m}^{-3}$ ) und beim Negativszenario 12 % ( $93 \text{ ct m}^{-3}$ ). Im Vergleich dazu führt der Kreditzinssatz extrahiert betrachtet bei einem Zinssatz von 2 % zu einer Gebührensteigerung von  $0,56 \text{ € m}^{-3}$  und bei einem Zinssatz von 4 % zu einer Steigerung von  $1,11 \text{ € m}^{-3}$ . Durch die Überlagerung von Kreditzinssatz und Inflation bewirken allein die Zinskosten bei einem Zinssatz von 4 % und einer Inflationsrate von 2,5 % eine Gebührensteigerung von  $2,43 \text{ € m}^{-3}$ . Die Inflation hat den größten Einfluss auf die Gebührenentwicklung, denn bei einer Inflationsrate von 2,5 % beträgt der inflationsbegründete Anteil der Gebührensteigerung ohne Berücksichtigung der dadurch steigenden Zinskosten  $4,34 \text{ € m}^{-3}$ . Mit Berücksichtigung der inflationsbedingten Zinskostensteigerung beträgt der durch die Inflation verursachte Gebührenanstieg insgesamt  $5,66 \text{ € m}^{-3}$ .

### Evaluierung und Bestätigung von Hypothese (1)

*Im Vergleich aller relevanten Faktoren, welche die Rahmenbedingungen der Schmutzwasser-entsorgung ausmachen und als Kostentreiber zu deklarieren sind, ist die durch den Bevölkerungsrückgang bedingte Gebührensteigerung moderat und zu bewältigen.*

Basierend auf den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse kann Hypothese (1) verifiziert werden. Der Einfluss der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wiegt schwerer. Der Gebührensteigerungseffekt der Inflation ist unter den Rahmenbedingungen des Negativszenarios 6-fach höher als der des Bevölkerungsrückganges. Denn die Inflation ist der maßgebende Kosten- und Gebührentreiber. Sie wirkt auf sämtliche Kosten und in Kombination mit hohen Kreditzinssätzen kommt es neben hohen Abschreibungen aufgrund steigender Reinvestitionskosten auch zu hohen Zinskosten. Der jährliche Gebührenanstieg durch den Bevölkerungsrückgang bis 2050 beträgt beim Realszenario lediglich 0,3 % und beim Negativszenario 1 %. Beim Realszenario entspricht der Gebührenanstieg der Reallohnentwicklung in M-V, so dass es faktisch durch den Bevölkerungsrückgang zu keiner zusätzlichen Belastung der Haushalte käme. Mit den Annahmen des Negativszenarios würde die Belastung der Haushalte durch den Bevölkerungsrückgang jährlich um 0,7 % steigen. Demnach ist der Gebührenanstieg, welcher sich ausschließlich durch den Bevölkerungsrückgang ergibt, von den Gebührenzahlern zu bewältigen. Anders verhält es sich mit den durch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen verursachten Steigerungen.

Die Anwendung des Modells zur Untersuchung der künftigen wirtschaftlichen und technischen Entwicklung des betrachteten Aufgabenträgers erfolgte mittels zweier Ansätze. Basierend auf einer MCS-Analyse wurde die Mengengebührenentwicklung unter Variation der Rahmenparameter innerhalb ihrer Spannweiten und unter Voraussetzung der Normalverteilung ermittelt. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % liegt die Mengengebühr im Rahmen der definierten Spannweiten in 2050 bei  $5,13 \text{ € m}^{-3}$ . Dies entspricht einem Gebührenanstieg von 97,3 %. Die sich daraus ergebende Haushaltsbelastung durch die SWW für einen ZPH ist mit 2,6 % nach den OECD Maßstäben als angemessen anzusehen. Aufgrund der Matrizenstruktur und des Datenvolumens erfolgte bei der MCS keine Auswertung der prozessbasierten Parameter. Die Betrachtung und Auswertung der prozessbasierten Parameter und Kostenstruktur erfolgte in einem zweiten Schritt mittels Szenario-Simulationen. Unter Berücksichtigung der möglichen Spannweiten auf Basis der Rahmenparameterprädiktion wurden drei

Szenarien untersucht. Die Ergebnisse aus der Szenarien-Analyse verdeutlichen, dass bei einer Bevölkerungsreduktion (Sz II und Sz III) die Betriebsstoffverbräuche (Fällmittel, Energie) und Schlamm-mengen sinken, die Kosten dafür jedoch durch die Inflation weiter ansteigen. Eine Stagnation der Bevölkerungszahl und geringfügig steigender Wasserverbrauch (Sz I) führen auch bei Ausschluss der Inflation aufgrund steigender Verbräuche bei den Betriebsstoffen und steigenden Aufwänden bei den bezogenen Leistungen zu einem moderaten Anstieg bei den Gebühren. Dieser beträgt bis 2050 17,9 %. Innerhalb der Rahmenbedingungen des Real- und Negativszenarios würde eine Gebührensteigerung von 139 % und 304 % resultieren. Der OECD-Richtwert bezüglich angemessener Haushaltsbelastungen durch die Wasserver- und Abwasserentsorgung wird für einen ZPH nur im Negativszenario überschritten. Dies geschieht bereits ab 2035. Bis 2050 steigt die Haushaltsbelastung auf 4,6 %. Bei den SH erfolgt eine Richtwertüberschreitung bereits im Realszenario ab 2043, welche sich bis 2050 auf 3,1 % kumuliert. Im Negativszenario wird der Richtwert für SH bereits in 2029 überschritten. In diesem Szenario würde sich bis 2050 für SH eine Haushaltsbelastung von 4,8 % ergeben.

### Evaluierung und Bestätigung von Hypothese (2)

*Unabhängig vom Bevölkerungsrückgang erscheint ohne entgegenwirkende Maßnahmen ein Gebührenanstieg im Bereich der Schmutzwasserentsorgung unvermeidbar.*

In Folge der Ergebnisse aus der MCS und der Szenarien-Analyse kann auch Hypothese (2) bestätigt werden. Denn auch unter den positiven Rahmenbedingungen von Sz I steigt die Gebühr zum Ende des Betrachtungshorizontes an. Die Gebührensteigerung resultiert in diesem Szenario aus der entfallenden Gebührenminderung durch die Auflösung der Beiträge und Fördermittel im Laufe des Betrachtungszeitraumes. Zusätzlich fallen für die Reinvestition von zuvor geförderten Anlagen Zinskosten an. Ohne weitere Erschließungsbeiträge bzw. Erneuerungsbeiträge sowie die Fortführung von Förderprogrammen werden die Gebühren unvermeidlich ansteigen auch bei einer Nullzinspolitik und niedrigen Inflation. In den letzten Jahren beträgt die Inflation zwischen 1,5 % bis 2 % und es ist zu vermuten, dass auch die Darlehenszinsen langfristig wieder ansteigen werden. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Bundesländern schwachen Gehaltsentwicklung in M-V führt bereits eine geringe jährliche Gebührensteigerung ( $> 0,3 \% a^{-1}$ ) zu einer höheren Haushaltsbelastung. Neben den betrachteten Faktoren der zukünftigen Gebührenentwicklung werden durch höhere Anforderungen an die Qualität des einzuleitenden Abwassers (Verringerung der Nährstoffeinträge, Mikroschadstoffe, resistente Keime, Mikroplastik) weitere Investitionen notwendig, dies führt zu weiteren Kosten- und Gebührensteigerungen.

Der durch die Prognoseergebnisse des Modells bestätigte, unvermeidliche Gebührenanstieg veranlasst zur Konzeption von dagegenwirkenden Maßnahmen. Von den aufgeführten Maßnahmen wurden drei ausgewählt und mittels Modulkonzeption in das Modell integriert. Auf diese Weise fand eine Effektivitäts- und Potentialanalyse von zwei infrastrukturellen Anpassungsmaßnahmen statt. Zum einen unter dem Aspekt von Eigenenergieerzeugung und -verbrauch mittels Schlammverwertungszentren, zum anderen durch Stilllegungen von KA im Sinne einer weitergehenden Zentralisierung. Als dritte Maßnahme wurde aus dem Bereich Organisation der Zusammenschluss von Aufgabenträgern untersucht. Dabei wurde zwischen Synergieeffekten, welche sich aus einer Kooperation und Fusion

ergeben, unterschieden. Der Fusions- bzw. Kooperationspartner wurde anhand einer Potentialanalyse der angrenzenden Aufgabenträger ausgewählt. In Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen in den Szenarien variiert das Einsparpotential der Maßnahmen. Bei der Einzelmaßnahmenbetrachtung hat das höchste Einsparpotential der Zusammenschluss von Aufgabenträgern. In Sz I wird das größte Einsparpotential durch eine Kooperation verwirklicht. Dies ändert sich mit zunehmend negativeren Rahmenbedingungen, wie in Sz II und Sz III, denn unter diesen Bedingungen hat die Fusionierung einen größeren Einspareffekt. Bei den infrastrukturellen Anpassungsmaßnahmen würde sich eine Einsparung lediglich durch ein Schlammverwertungszentrum ergeben. Das Einsparpotential dieser Maßnahme steigt mit zunehmender Teuerung der Energiepreise. Da der betrachtete Aufgabenträger bereits eine Faulgasverwertungsanlage betreibt, fällt diese Maßnahme aus dem Handlungsportfolio heraus. Dennoch wurde diese Maßnahme auf das alleinige Potential des kommunalen Abwasserstroms (da gegenwärtig hoher Gewerbe- und Industrieanteil) hin untersucht. Die Ergebnisse der Maßnahmenuntersuchung belegen, dass durch eine Kooperation mit dem ausgewählten benachbarten Aufgabenträger die prognostizierte Haushaltsbelastung des Negativszenarios von 2,5 % für die SWE und 4,6 % für die SWW sich auf 2,3 % für die SWE und 4,2 % für die SWW reduzieren lässt. Bei einer Fusion und der Gründung eines neuen Aufgabenträgers sinkt die Haushaltsbelastung auf 1,5 % für die SWE und 3,0 % für die SWW. Mit diesen Maßnahmen ließe sich die Belastung der Haushalte auch unter schlechten Rahmenbedingungen auf den Richtwert der OECD von 3 % senken und läge somit im angemessenen Bereich.

### Evaluierung und Bestätigung von Hypothese (3)

*Durch kurz- bis mittelfristige Anpassungsmaßnahmen lässt sich der Gebührenanstieg abmildern, wodurch sich in Zukunft auch in Regionen mit einem starken Bevölkerungsrückgang zumutbare Gebühren erzielen lassen.*

Im Rahmen der mit dem Modell untersuchten Anpassungsmaßnahmen kann die Hypothese (3) für den betrachteten Aufgabenträger bestätigt werden. Die Quantifizierung der Einzelmaßnahmeneffekte konnte aufzeigen, dass im kurzfristigen Zeithorizont sich durch die Synergien einer Fusion oder Kooperation Einsparungen ergeben würden, welche die Haushaltsbelastung wesentlich reduzieren. Für den betrachteten Aufgabenträger wäre die Haushaltsbelastung durch eine Fusion mit einem der benachbarten Aufgabenträger auch unter den negativen Rahmenbedingungen von Sz III auf ein von der OECD als angemessen angesehenes Niveau reduzierbar. Bei den Anpassungsmaßnahmen im Bereich der technischen Infrastruktur mit einem langfristigen Zeithorizont würden sich durch die Zentralisierung oder mittels Schlammverwertungszentren lediglich geringe Einsparungen ergeben. In Kombination mit einer Fusion können sich durch die Vergrößerung des Entsorgungsgebietes und weiteren KA-Standorten zusätzliche Einsparpotentiale bei der technischen Infrastruktur ergeben. Auf diese Weise würde unter den ungünstigsten Rahmenbedingungen der Szenarien das größte Einsparpotential aus der Maßnahmenkombination Fusion und Zentralisierung resultieren. Demnach begünstigt die Schaffung von größeren Strukturen, neben den Einsparungen in der Verwaltung, weitere Einsparpotentiale durch Optimierungen der technischen Infrastruktur. In Anbetracht der aufgeführten Maßnahmen ist in Abhängigkeit von den zukünftigen wirtschaftlichen und gebietspezifischen

Rahmenbedingungen eine im Vergleich zu den betrachteten Maßnahmen bessere Gebührenentwicklung für die Haushalte erzielbar.

Mit wachsendem Prognosehorizont verringert sich die Genauigkeit der Vorhersage. Entwicklungen über lange Zeiträume sind nur bedingt prädiktierbar. Im Hinblick auf wirtschaftliche oder politische Rahmenbedingungen können sich diese unvorhersehbar schnell ändern. Die für diese Arbeit hergeleitete weite Range der Rahmenparameter deckt einen großen Bereich an zukünftigen möglichen Gegebenheiten ab, weshalb die Ergebnisse eine repräsentative Aussagekraft besitzen. Aufgrund der unterschiedlichen Unternehmensformen, Gebietsgrößen, technischen Infrastrukturen sowie regionalen Besonderheiten von Aufgabenträgern, sind die Ergebnisse jedoch nicht pauschal auf andere Aufgabenträger übertragbar. Die grundlegenden Aussagen und Hypothesen gelten jedoch für eine Vielzahl von Aufgabenträgern. Im welchen Ausmaß die einzelnen betrachteten Rahmenparameter auf andere Aufgabenträger wirken, ist im Einzelfall zu untersuchen.

### 10.2 Ausblick

Das im Rahmen dieser Untersuchung entwickelte Modell kann mit geringem Aufwand sowohl auf andere Unternehmensformen von Aufgabenträgern im Bereich der Schmutzwasserentwässerung als auch auf abweichende Regelungen bei den KAG anderer Bundesländer angepasst werden. Zur ganzheitlichen Betrachtung von Aufgabenträgern der Abwasserwirtschaft wären modulare Ergänzungen für die Abbildung der Regenwasserbewirtschaftung zu entwickeln. Mit dieser Erweiterung wären Quantifizierungen von Wechselwirkungen zwischen der Abwasser- und Regenwasserentsorgung durchführbar. Insbesondere die Einflüsse von klimatischen Veränderungen oder Flächenabkopplungen, welche einen Einfluss auf die technische Infrastruktur aber auch auf die Kosten und damit Gebühren haben, könnten auf diese Weise bestimmt werden. In Ergänzung für Aufgabenträger, welche auch die Leistung der Trinkwasserversorgung erbringen, wäre die Entwicklung eines Moduls zur Abbildung der technischen Infrastruktur bestehend aus Leitungsnetzen, Wasseraufbereitungs- und PWK umsetzbar. Damit wäre die siedlungswasserwirtschaftliche Abbildung eines Aufgabenträgers aus dem Aspekt der Ver- und Entsorgung sowie die Wechselwirkungen zwischen den Teilbereichen möglich. Bei den konzipierten bereits bestehenden Modulen für die Abbildung der Schmutzwasserentsorgung sind andere Ansätze zur Prozessabbildung in den KA und für das SWEN integrierbar. Diesbezüglich könnten die ASM der IWA, welche als „Open Source“ zur Verfügung stehen, in das Modell eingebettet oder Schnittstellen zu offenen Simulatoren hergestellt werden. Eine unterstützende Erweiterung im Bereich der Kostenermittlung wären Ansätze zur Bestimmung von Zuständen (Alterungsmodelle) für KA-Komponenten; diese stehen gegenwärtig noch nicht zur Verfügung. Mittels solcher Ansätze ließen sich die Kosten für KA-Reparaturen ermitteln. Bisher werden die Reinvestitionszeitpunkte über die Nutzungsdauern bestimmt, mit einem Alterungsmodell wären diese zusätzlich über den Zustand bestimmbar. Des Weiteren ließen sich Reparaturkosten herleiten und auf dieser Basis in Analogie zu den Auswertungen des Moduls *SWEN* Reinvestitionsstrategien entwickeln.

Mit dem entwickelten Modellansatz lassen sich Aufgabenträger im Bereich der Schmutzwasserentsorgung abbilden und deren zukünftige Entwicklung mit hoher Aussagekraft prognostizieren. Eine



pauschale Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Aufgabenträger ist aufgrund der unterschiedlichen Strukturen und Gebietscharakteristika jedoch nicht gegeben. Diesbezüglich wären für eine umfassende Übersicht über die zukünftige Entwicklung dieses Bereiches der Abwasserwirtschaft weitere Studien mit Aufgabenträgern unterschiedlicher Unternehmensformen, Gebietsgrößen, technischen Infrastrukturen, Siedlungsstrukturen bzw. Siedlungsdichten sowie regionalen Besonderheiten empfehlenswert. Neben der Potentialanalyse der drei ausgewählten Anpassungsmaßnahmen würde die modellseitige Untersuchung weiterer Anpassungsmaßnahmen das Handlungsportfolio erweitern. Unter anderem sollte hierbei der Fokus auch verstärkt auf die finanzwirtschaftlichen Maßnahmen gelenkt werden, um das Potential dieser Effekte auf die Gebührenentwicklung besser abschätzen zu können.

## 11. Literaturverzeichnis

- Abbott, M.; Cohen, B.; Wang, W. C. (2012): The performance of the urban water and wastewater sectors in Australia. In: *Utilities Policy*, 20 (1), S. 52–63.
- Adeniran, E. A.; Bamiro, O. A. (2010): A system dynamics strategic planning model for a municipal water supply scheme. In: *Proceedings of the 28th International Conference of the System Dynamics Society*, 25–29 July, Seoul (Korea).
- Ahammed, M.; Melchers, R. E. (1994): Reliability of underground pipelines subjected to corrosion. In: *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, 120 (6), S. 989–1003.
- Ahmad, S.; Prashar, D. (2010): Evaluating Municipal Water Conservation Policies Using a Dynamic Simulation Model. In: *Water Resources Management*, 24 (13), S. 3371–3395.
- Ahnert, M.; Alex, J.; Dürrenmatt, D. J.; Langergraber, G.; Hobus, I.; Schmuck, S. (2015): Dynamische Simulation als Dynamische Simulation als Bestandteil einer Kläranlagenbemessung nach DWA-A 131. In: *KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 62 (7), S. 615–624.
- Alegre, H.; Baptista, J. F.; Jr, Cabrera; Cubillo, F.; Duarte, P.; Hirner, W. et al. (2013): Performance Indicators for Water Supply Services. 2. Aufl., London: IWA - Publishing. ISBN: 978-1-78040-529-2.
- Alex, J.; Benedetti, L.; Copp, J.; Gernaey, K. V.; Jeppsson, U.; Nopens, I. et al. (2008): Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1). Technical Report, Lund University, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund (Sweden).
- Alex, J.; Ahnert, M.; Dürrenmatt, D. J.; Langergraber, G.; Hobus, I.; Schmuck, S. (2015): Voraussetzungen für eine dynamische Simulation als Bestandteil einer Kläranlagenbemessung nach DWA-A 131. In: *KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 62 (5), S. 436–446.
- Alex, J.; Wichern, M.; Halft, N.; Spring, V.; Ahnert, M.; Frehmann, T.; Hobus, I. et al. (2007): A method to use dynamic simulation in compliance to stationary design rules to refine WWTP planning. In: *Proceedings of the 10th IWA Specialised Conference on Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants*, 10.–13. September, Vienna (Austria).
- Altvater, E. (2004): The privatisation of public goods - The impact on governance and on the coordination of economic policy. A case study: Cross-border leasing. Rosa-Luxemburg-Stiftung, Berlin, Policy Paper 2.
- American Water Works Association (2004): Selection and definition of performance indicators for water and wastewater utilities. AWWA - American Water Works Association, Denver (USA).
- Ana, E.; Bauwens, W.; Pessemier, M.; Thoeye, C.; Smolders, S.; Boonen, I.; Gueldre, G. de (2009): An investigation of the factors influencing sewer structural deterioration. In: *Urban Water Journal*, 6 (4), S. 303–312.
- Ana, E. V.; Bauwens, W. (2010): Modeling the structural deterioration of urban drainage pipes: the state-of-the-art in statistical methods. In: *Urban Water Journal*, 7 (1), S. 47–59.
- Andreou, S. A.; Marks, D. H.; Clark, R. M. (1987a): A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Applications. In: *Advance in Water Resources*, 10, S. 11–20.

- Andreou, S. A.; Marks, D. H.; Clark, R. M. (1987b): A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Theorie. In: *Advance in Water Resources*, 10, S. 2–10.
- Andrews, M.; Berardo, P.; Foster, D. (2011): The sustainable industrial water cycle - a review of the economics and approach. In: *Water Supply*, 11 (1), S. 67–77.
- Appels, L.; Baeyens, J.; Degève, J.; Dewil, R. (2008): Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. In: *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 (6), S. 755–781.
- Ariaratnam, S. T.; El-Assaly, A.; Yang, Y. (2001): Assessment of infrastructure inspection needs using logistic models. In: *Journal of Infrastructure Systems*, 7 (4), S. 160–165.
- ATV-DVWK (2003): Phosphorrückgewinnung. Arbeitsbericht der ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.1 "Phosphorrückgewinnung". In: *KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 50 (6), S. 805–814.
- ATV-DVWK-A131 (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- ATV-DVWK-A281 (2001): Bemessung von Tropfkörpern und Rotationstauchkörpern. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- Baik, H. S.; Jeong, H. S.; Abraham, D. M. (2006): Estimating transition probabilities in Markov chain-based deterioration models for management of wastewater systems. In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132, S. 15–24.
- Balmér, P.; Mattson, B. (1994): Wastewater treatment plant operation costs. In: *Water Science and Technology*, 30 (4), S. 7–15.
- Banker, R. D.; Charnes, A.; Cooper, W. W. (1984): Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiency in Data Envelopment Analysis. In: *Management Science*, 30 (9), S. 1078–1092.
- Barat, R.; Serralta, J.; Ruano, M. V.; Jiménez, E.; Ribes, J.; Seco, A.; Ferrer, J. (2013): Biological Nutrient Removal Model N° 2 (BNRM2): A general model for Wastewater Treatment Plants. In: *Water Science and Technology*, 67 (7), S. 1481–1489.
- Barat, R.; Montoya, T.; Seco, A.; Ferrer, J. (2011): Modelling biological and chemically induced precipitation of calcium phosphate in enhanced biological phosphorus removal systems. In: *Water Research*, 45 (12), S. 3744–3752.
- Bastone, D. J.; Keller, J.; Angelidaki, I.; Kalyuzhnyi, S. V.; Pavlostathis, S. G.; Rozzi, A.; Sanders, W. T. M. et al. (2002): Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). Scientific and Technical Report, IWA Publishing, London, No. 13.
- Battese, G. E.; Rao, D. S. P.; O'Donnell, C. J. (2004): A Metafrontier Production Function for Estimation of Technical Efficiencies and Technology Gaps for Firms Operating Under Different Technologies. In: *Journal of Productivity Analysis*, 21 (1), S. 91–103.
- Battese, G. E.; Rao, D. S. P. (2002): Technology Gap, Efficiency and a Stochastic Metafrontier Function. In: *International Journal of Business and Economics*, 1 (2), S. 87–93.
- Battistoni, P.; Fatone, F.; Passacantando, D.; Bolzonella, D. (2007): Application of food waste disposers and alternate cycles process in small-decentralized towns: A case study. In: *Water Research*, 41 (4), S. 893–903.

- Baur, R.; Zielichowski-Haber, W.; Kropp, I. (2004): Statistical analysis of inspection data for the asset management of sewer networks. In: Proceedings 19th EJSW on Process Data and Integrated Urban Water Modeling, March, Lyon (France).
- Baur, R.; Herz, R. (2002): Selective inspection planning with ageing forecast for sewer types. In: Water Science and Technology, 46 (6-7), S. 389–396.
- BDEW (2015): Industriestrompreise: Energieinfo - Ausnahmeregelungen bei Energiepreisbestandteilen. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin.
- BDEW (2012): Leitfaden zur Wasserpreiskalkulation: Gutachten „Kalkulation von Trinkwasserpreisen. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin.
- Bellefontaine, K.; Breitenbach, H. (2008): Auswirkungen der demografischen Entwicklung auf die Gebührenkalkulation und die Gebührenentwicklung in der Wasserwirtschaft. In: KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall, 55 (9), S. 996–1001.
- Benedetti, L.; Bixio, D.; Claeys, F.; Vanrolleghem, P. A. (2008): Tools to support a model-based methodology for emission/immission and benefit/cost/risk analysis of wastewater systems that considers uncertainty. In: Environmental Modelling & Software, 23 (8), S. 1082–1091.
- Benedetti, L.; Bixio, D.; Vanrolleghem, P. A. (2006a): Assessment of WWTP design and upgrade options: balancing costs and risks of standards' exceedance. In: Water Science and Technology, 54 (6-7), S. 371–378.
- Benedetti, L.; Bixio, D.; Vanrolleghem, P. A. (2006b): Benchmarking of WWTP design by assessing costs, effluent quality and process variability. In: Water Science and Technology, 54 (10), S. 95–102.
- Berg, C.; Danilenko, A. (2011): The IBNET water supply and sanitation performance blue book. World Bank, Washington DC, Water and Sanitation Program.
- Berger, C.; Lohaus, J.; Wittner, A.; Schäfer, R. (2001): Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der ATV-DVWK Umfrage 2001. In: KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall, 49 (3), S. 302–311.
- Bergmann, L.; Schaefer, C. (2008): Mechanik, Akustik, Wärme. 12. Aufl., Berlin: de Gruyter, Lehrbuch der Experimentalphysik. ISBN: 978-3-11019-311-4.
- Berg, S.; Padowski, J. (2010): Overview of Water Utility Benchmarking Methodologies: From Indicators to Incentives. University of Florida (USA), Public Utility Research Center.
- Bigambo, T.; Mayo, A. W. (2005): Nitrogen transformation in horizontal subsurface flow constructed wetlands II: Effect of biofilm. In: Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 30 (11-16), S. 668–672.
- Birkholz, T. (2009): Handlungserfordernisse und Optimierungsansätze für kommunale Ver- und Entsorgungsunternehmen im Zusammenhang mit demografischen Veränderungen im ländlichen Raum aufgezeigt an einem Beispiel in Mecklenburg-Vorpommern. Unter Mitarbeit von Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Schriftenreihe Umweltingenieurswesen: Siedlungswasserwirtschaft, Band 20. ISBN: 978-3-86009-416-7.
- Blasius, H. (1913): Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten: über den Gültigkeitsbereich der beiden Ähnlichkeitsgesetze in der Hydraulik. Düsseldorf: VDI Verlag,

- Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, insbesondere der Technischen Hochschulen, Band 131.
- BMWi (2016): EEG in Zahlen: Vergütungen, Differenzkosten und EEG-Umlage 2000 bis 2017. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- Bode, H.; Lemmel, P. (2001): International product cost comparison in the field of water management. In: *Water Science and Technology*, 44 (2-3), S. 85–93.
- Borovsky, I. (2001): Detaillierte Schmutzfrachtmodellierung unter Berücksichtigung von Kanalablagernungen. Hannover: Verlagsgesellschaft, Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz SuG, Heft 25.
- Box, G. E. P.; Jenkins, G. M.; Reinsel, G. C.; Ljung, G. M. (2016): *Time series analysis: Forecasting and control*. 5. Aufl., New Jersey (USA): John Wiley & Sons Inc. ISBN: 978-1-11867-502-1.
- Brémond, B. (1997): Statistical modelling as help in network renewal decision. European commission co-operation on science and technology (COST), Committee C3 - diagnostics of urban infrastructure, Paris.
- Brun, R.; Kühni, M.; Siegrist, H.; Gujer, W.; Reichert, P. (2002): Practical identifiability of ASM2d parameters—systematic selection and tuning of parameter subsets. In: *Water Research*, 36 (16), S. 4113–4127.
- Bundesnetzagentur (2018): EEG-Umlage sinkt im Jahr 2019 auf 6,405 ct/kWh. Bundesnetzagentur, Bonn, Pressemitteilung, 15. Oktober.
- Camp, R. C. (1989): *Benchmarking: The search for industry best practices that lead to superior performance*. New York: White Plains, Quality Resources.
- Carvalho, P.; Marques, R. C. (2011): The influence of the operational environment on the efficiency of water utilities. In: *Journal of Environmental Management*, 92 (10), S. 2698–2707.
- Chambers, B.; Jones, G. L. (1988): Optimisation and uprating of activated sludge plants by efficient process design. In: *Water Science and Technology*, 20 (4-5), S. 121–132.
- Charnes, A.; Cooper, W.; Rhodes, E. (1978): Measuring the efficiency of decision making units. In: *European Journal of Operational Research*, 2 (6), S. 429–444.
- Chen, K.; Yang, H. (2011): A cross-country comparison of productivity growth using the generalised metafrontier Malmquist productivity index: with application to banking industries in Taiwan and China. In: *Journal of Productivity Analysis*, 35 (3), S. 197–212.
- Chen, W.; Lu, X.; Yao, C.; Zhu, G.; Xu, Z. (2015): An efficient approach based on bi-sensitivity analysis and genetic algorithm for calibration of activated sludge models. In: *Chemical Engineering Journal*, 259, S. 845–853.
- Clark, R. M.; Stafford, C. L.; Goodrich, J. A. (1982): Water distribution systems: A spatial and cost evaluation. In: *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, ASCE, 108 (3), S. 243–256.
- Constantine, A. G.; Darroch, J. N. (1995): Predicting underground pipeline failure. In: *Water*, 2 (2), S. 9–10.
- Constantine, A. G.; Darroch, J. N. (1993): Pipeline Reliability. In: *Proceedings of the Australia-Japan Workshop: Stochastic models in engineering technology and management*, 14-16. July, Gold Coast (Australia). ISBN: 978-9-81453-558-8.

- Cooper, W. W.; Li, Shanling; Seiford, L. M.; Tone, Kaoru; Thrall, R. M.; Zhu, J. (2001): Sensitivity and Stability Analysis in DEA: Some Recent Developments. In: *Journal of Productivity Analysis*, 15 (3), S. 217–246.
- Copp, J. B.; Jeppsson, U.; Vanrolleghem, P. A. (2008): The benchmark simulation models - a valuable collection of modelling tools. In: *Proceedings of the iEMSs Fourth Biennial Meeting: International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs) July 7–8, Barcelona (Spanien)*.
- Copp, J. B.; Jeppsson, U.; Rosen, C. (2003): Towards an ASM1-ADM1 state variable interface for plant-wide wastewater treatment modelling. In: *Proceedings of 76th Annual WEF Conference and Exposition, 11.–15. October, Los Angeles (USA)*.
- Copp, J. B. (2002): The COST simulation benchmark: Description and simulator manual : a product of COST Action 624 and COST Action 682. EUR-OP, Luxemburg, Band 19993. ISBN: 978-9-28941-658-0.
- Corominas, L. L.; Rieger, L.; Takács, I.; Ekama, G.; Hauduc, H.; Vanrolleghem, P. A. et al. (2010): New framework for standardized notation in wastewater treatment modelling. In: *Water Science and Technology*, 61 (4), S. 841–857.
- Davies, J. P.; Clarke, B. A.; Whiter, J. T.; Cunningham, R. J. (2001): Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. In: *Urban Water*, 3 (1-2), S. 73–89.
- Denkert, R. (2007): Eindickung, Entwässerung und Trocknung von Klärschlamm. DWA-Fortbildungskurs M/4 "Schlammbehandlung, -verwertung und -beseitigung", Kassel.
- Deutsche Bundesbank (2017): Umlaufrenditen inländischer Inhaberschuldverschreibungen / Anleihen der öffentlichen Hand / Monatsdurchschnitte. Hg. v. Statistisches Bundesamt (DESTATIS). Frankfurt am Main (Zeitreihe BBK01.WU0004). Online verfügbar unter [www.bundesbank.de](http://www.bundesbank.de), zuletzt geprüft am Mrz. 2017.
- Dirksen, J.; Clemens, F. (2008): Probabilistic modeling of sewer deterioration using inspection data. In: *Water Science and Technology*, 57 (10), S. 1635–1641.
- Doleac, M. L.; Lackey, S. L.; Bratton, G. N. (1980): Prediction of time-to failure for buried cast iron pipe. In: *Proceedings of American water works association annual conference, Denver (USA)*.
- DWA (2016): Bemessung von Kläranlagen in warmen und kalten Klimazonen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef. ISBN: 978-3-88721-409-8.
- DWA (2014): Wirtschaftsdaten der Abwasserbeseitigung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- DWA (2012a): 25. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen: Reinigungsverfahren auf dem Prüfstand. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- DWA (2012b): Kalkulation von Gebühren und Beiträgen der Abwasserbeseitigung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef. ISBN: 978-3-94296-463-5.
- DWA (2012c): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen: KVR-Leitlinien. 8. Aufl., Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef. ISBN: 978-3-941897-55-7.

- DWA (2008a): Alterungsmodelle für Entwässerungssysteme: Entwicklung, Anforderungen und Nutzen. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES-8.9 "Sanierungsstrategien". In: KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall, 55 (7), S. 766–770.
- DWA (2008b): Neuartige Sanitärsysteme. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef. ISBN: 978-3-94108-937-4.
- DWA-A-110 (2006): Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und -kanälen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.
- DWA-A-131 (2016): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen - Entwurf. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-A-133 (2005): Wertermittlung von Abwasseranlagen: Systematische Erfassung, Bewertung und Fortschreibung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-A-201 (2005): Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Abwasserteichanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- DWA-A-202 (2011): Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-A-262 (2006): Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen mit bepflanzten Bodenfiltern zur biologischen Reinigung kommunalen Abwassers. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-M-143-1 (2004): Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden: Teil 1: Grundlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.
- DWA-M-149-3 (2015): Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden Teil 3: Beurteilung nach optischer Inspektion. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-M-271 (2017): Personalbedarf für den Betrieb kommunaler Kläranlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.
- DWA-M-363 (2010): Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogas. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- DWA-M-366 (2000): Maschinelle Schlammabtrennung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-M-368 (2014): Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-M-380 (2009): Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- DWA-M-381 (2007): Klärschlammverdickung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.
- Eisenbeis, P.; Rostum, J.; Le Gat, Y. (1999): Statistical models for assessing the technical state of water networks - Some European experiences. In: Proceedings of the AWWA Annual Conference, 20.-24. June, Chicago.

- Ekama, G. A.; Marais, G. v. R.; Pitman, A. R.; Keay G. F.; P., Buchan, L.; Gerber, A.; Smollen, M. (1984): Theory, Design and Operation of Nutrient Removal Activated Sludge Processes. South African Water Research Commission, Pretoria.
- Ens, A. (2012): Development of a Flexible Framework for Deterioration Modeling in Infrastructure Asset Management. University of Toronto, Department of Civil Engineering, Toronto.
- DIN EN 752 5: 1997-11: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Teil 5: Sanierung.
- Fama, E. F.; French, K. R. (2004): The Capital Asset Pricing Model: Theory and Evidence. In: Journal of Economic Perspectives, 18 (3), S. 25–46.
- Färe, R.; Grosskopf, S.; Lovell, C. A. K. (1994): Production frontiers. Cambridge University, Cambridge (UK). ISBN: 978-0-52142-033-4.
- Flores-Alsina, X.; Corominas, L.; Neumann, M. B.; Vanrolleghem, P. A. (2012): Assessing the use of activated sludge process design guidelines in wastewater treatment plant projects: A methodology based on global sensitivity analysis. In: Environmental Modelling & Software, 38 (12), S. 50–58.
- Flores-Alsina, X.; Rodriguez-Roda, I.; Sin, G.; Gernaey, K. V. (2009): Uncertainty and sensitivity analysis of control strategies using the benchmark simulation model No1 (BSM1). In: Water Science and Technology, 59 (3), S. 491–499.
- Ford, A. (1999): Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Models of Environmental Systems. Washington: Island Press. ISBN: 978-1-55963-600-1.
- Forrester, J. (1969): Urban Dynamics. Cambridge (USA): MIT Press. ISBN: 978-1-88382-339-9.
- Forrester, J. (1958): Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers. In: Harvard Business Review, 36 (4), S. 37–66.
- Franz, T. (2005): Gewinnerzielung durch kommunale Daseinsvorsorge: Zugleich eine Untersuchung zu den Zwecken und Formen der kommunalen wirtschaftlichen Betätigung. Tübingen: Mohr Siebeck, Jus publicum, Band 123. ISBN: 978-3-16148-582-4.
- Frey, W. (2012): Stand und Trends bei der Faulgasverwertung auf Kläranlagen. ÖWAV-TU Seminar „Standortbestimmung in der Wassergütwirtschaft“, 28.-29. Februar, Wiener Mitteilungen, Band 226.
- Galar, D.; Berges, L.; Sandborn, P.; Kumar, U. (2014): The need for aggregated indicators in performance asset management. In: Maintenance and Reliability, 16 (1), S. 120–127.
- Ganjidoost, A.; Hass, C.; Knight, M.; Unger, A. (2015): A System Dynamics Model For Integrated Water Infrastructure Asset Management. In: Proceedings of the 33rd International Conference of the System Dynamics Society, Cambridge (USA).
- Gawel, E.; Köck, W.; Kern, K.; Schindler, H.; Holländer, R.; Anlauf, K. et al. (2014): Reform der Abwasserabgabe: Optionen, Szenarien und Auswirkungen einer fortzuentwickelnden Regelung. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Umweltforschungsplan, Dessau-Roßlau, Forschungskennzahl 3711 26 202, UBA-FB 001926.
- Gebhard, V. (2009): Interaktionen bei der Modellierung von Stofftransport: Sedimenthaushalt und Abfluss in der Siedlungsentwässerung. Dissertation, Technische Universität Dresden, Institut für Siedlungswasserwirtschaft.



- Gernaey, K. V. (2014): Benchmarking of control strategies for wastewater treatment plants. International Water Association, London, Scientific and technical report, Band 23. ISBN: 978-1-78040-117-1.
- Gernaey, K. V.; van Loosdrecht, M. C.M; Henze, M.; Lind, M.; Jørgensen, S. B. (2004): Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of the art. In: Environmental Modelling & Software, 19 (9), S. 763–783.
- Gebner, J. (2009): Dienstleistungsauftrag oder -konzession - Betreibermodell auf dem Prüfstand. In: wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik (11), S. 42-44.
- Geyler, S.; Lautenschläger, S.; Lindstedt, S.; Milke, H.; Rüger, J.; Walther, S. (2014): Alternative dezentrale Sanitärlösungen im ländlichen Raum bei demografischem Wandel - sinnvoll und akzeptiert? In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall: Demografischer Wandel - Zukunftsfähige Abwasserkonzepte. Hennef, S. 165-186.
- Gießler, M.; Tränckner, J. (Hg.) (2014): Herausforderungen für die Aufgabenträger in Mecklenburg-Vorpommern aus demografischer und infrastruktureller Sicht. Rostock: Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Schriftenreihe Umweltingenieurswesen: Wasserwirtschaft, Band 49. ISBN: 978-3-86009-416-7.
- Gillot, S.; Vermeire, P.; Jacquet, P.; Grootaerd, H.; Derycke, D.; Simoeons, F.; Vanrolleghem, P. A. (1999): Integration of wastewater treatment plant investment and operating costs for scenario analysis using simulation. In: In: Proceeding of 13th Forum for Applied Biotechnology, 22-23. September, Gent (Belgium).
- Goulter, I. C.; Davidson, J.; Jacobs, P. (1993): Predicting water main breakage rate. In: Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 119 (4), S. 419–436.
- Goulter, I. C.; Kazemi, A. (1988): Spatial and temporal groupings of water main pipe breakage in Winnipeg. In: Canadian Journal of Civil Engineering, 15 (1), S. 91–97.
- Grady, C. P. L.; Daigger, G. T.; Lim, H. C. (2011): Biological Wastewater Treatment. 3. Aufl., Boca Raton: CRC Press, IWA Publishing. ISBN: 978-1-42000-963-7.
- Graetz, H. (2008): Synergiepotenzial einer fragmentierten Wasserwirtschaft: Beitrag zum Wert des Zusammenwirkens in fragmentierten Organisationsstrukturen der Wasserwirtschaft. Bauhaus Universität Weimar, Fakultät für Bauingenieurswesen, Professur für Bauwirtschaft, Schriftenreihe der Professur, Band 3.
- Grau, P.; Copp, J.; Vanrolleghem, P. A.; Takács, I.; Ayesa, E. (2009): A comparative analysis of different approaches for integrated WWTP modelling. In: Water Science and Technology, 59 (1), S. 141–147.
- Grau, P.; Gracia, M. de; Vanrolleghem, P. A.; Ayesa, E. (2007): A new plant-wide modelling methodology for WWTPs. In: Water Research, 41 (19), S. 4357–4372.
- Greenberg, R.; Nunamaker, T. (1987): A Generalized Multiple Criteria Model for Control and Evaluation of Nonprofit Organizations. In: Financial Accountability and Management, 3 (4), S. 331–342.
- Gretzschel, O.; Schmitt, T. G.; Hansen, J.; Siekmann, K.; Jakob, J. (2012): Schlammfäulung statt aerober Stabilisierung? Studie zur Wirtschaftlichkeit: Macht sich die Umstellung von aeroben Stabilisierungsanlagen auf Faulungsbetrieb bezahlt? In: wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik (3/2012), S. 27–33.

- Gretzschel, O.; Jakob, J.; Siekmann, K.; Hansen, J. (2011): Das Projekt NAWaS – Motivation und Vorgehensweise. In: Tagungsband "Schlammfäulung statt aerober Stabilisierung - Trend der Zukunft?", 22. November, TU Kaiserslautern, Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft, Band 30.
- Guest, J. S.; Skerlos, S. J.; Daigger, G. T.; Corbett, J. R. E.; Love, N. G. (2010): The use of qualitative system dynamics to identify sustainability characteristics of decentralized wastewater management alternatives. In: *Water Science and Technology*, 61 (6), S. 1637–1644.
- Gujer, W. (2006): Activated sludge modelling: Past, present and future. In: *Water Science and Technology*, 53 (3), S. 111–119.
- Gujer, W.; Henze, M.; Mino, T.; van Loosdrecht, M. C. M. (1999): Activated Sludge Model No. 3. In: *Water Science and Technology*, 39 (1), S. 183–193.
- Gustafson, J. M.; Clancy, D. V. (1999): Modelling the occurrence of breaks in cast iron water mains using methods of survival analysis. In: *Proceeding of the AWWA Annual Conference*, June, Chicago (USA).
- Hadzilacos, T.; Kalles, D.; Preston, N.; Melbourne, P.; Camarinopoulos, L.; Eimermacher, M. et al. (2000): UtilNets: a water mains rehabilitation decision-support system computers. In: *Environment and Urban Systems*, 24 (3), S. 215–232.
- Haider, H.; Sadiq, R.; Tesfamariam, S. (2016): Inter-Utility Performance Benchmarking Model for Small-to-Medium-Sized Water Utilities: Aggregated Performance Indices. In: *Journal of Water Resources Planning and Management Division, ASCE*, 142 (1), S. 4015039.
- Halbach, U. (2003): Kommunale Abwasserbeseitigung: Normative Kosten und Risikoabbau. 3. Aufl., Institut für Abwasserwirtschaft Halbach, Werdau. ISBN: 978-3-00011-255-3.
- Hamilton, J. D. (1994): Time series analysis. New York: Princeton Univ. Press. ISBN: 978-0-69104-289-3.
- Hannon, B.; Ruth, M.; Meadows, D. H. (2001): Dynamic Modelling. 2. Aufl., New York: Springer-Verlag. ISBN: 978-0-38798-868-9.
- Hao, X.; van Loosdrecht, M. C. M.; Meijer, S. C. F.; Qian, Y. (2001): Model-based evaluation of two BNR processes - UCT and A2N. In: *Water Research*, 35 (2), S. 2851–2860.
- Hartmann, L. (1993): Biologische Abwasserreinigung. 3. Aufl., Berlin: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-54055-363-2.
- Hauduc, H.; Gillot, S.; Rieger, L.; Ohtsuki, T.; Shaw, A.; Takács, I.; Winkler, S. (2009): Activated sludge modelling in practice: an international survey. In: *Water Science and Technology*, 60 (8), S. 1943–1951.
- Henze, M.; Gujer, W.; Mino, T.; van Loosdrecht, M. C. M. (2000): Activated Sludge Models: ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. London: IWA Publishing, Scientific and Technical Report, No. 9.
- Hernández-Sancho, F.; Molinos-Senante, M.; Sala-Garrido, R. (2011): Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: a non-radial DEA approach. In: *Science of The Total Environment*, 409, S. 2693–2699.
- Hernández-Sancho, F.; Molinos-Senante, M.; Sala-Garrido, R. (2010): Economic valuation of environmental benefits from wastewater treatment processes: An empirical approach for Spain. In: *Science of The Total Environment*, 408 (4), S. 953–957.

- Hernández-Sancho, F.; Sala-Garrido, R. (2009): Technical efficiency and cost analysis in wastewater treatment processes: A DEA approach. In: *Desalination*, 249, S. 230–234.
- Herz, R.; Werner, M.; Marschke, L. (2002): Anpassung der technischen Infrastruktur. In: BMVBW (Hg.): *Fachdokumentation zum Bundeswettbewerb "Stadtumbau-Ost" - Expertisen zu städtebaulichen und wohnungswirtschaftlichen Aspekten des Stadtumbaus in den neuen Ländern*. Berlin, S. 50-60.
- Herz, R. (2002): Computergestützte Erneuerung von Wasserversorgungsnetzen. In: *Tagungsband der 1. CARE-W Konferenz*, 1. November, Dresden. ISBN: 978-3-86005-335-5.
- Herz, R. (1996): Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water distribution networks. In: *Journal of Water Supply Research and Technology - AQUA*, 45 (5), S. 221–231.
- Herz, R. (1995): Alterung und Erneuerung von Infrastrukturbeständen - ein Kohortenüberlebensmodell. In: *Jahrbuch für Regionalwissenschaft*, 14/15, S. 5–29.
- Hillenbrand, T.; Niederste-Hollenberg, J.; Holländer, R.; Lautenschläger, S.; Galander, C. (2011): Demografischer Wandel – Auswirkungen und Lösungsansätze für die Abwasserinfrastruktur. In: *KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 58 (12), S. 1132–1138.
- Hillenbrand, T.; Niederste-Hollenberg, J.; Menger-Krug, E.; Klug, S.; Holländer, R.; Lautenschläger, S. et al. (2010): Demografischer Wandel als Herausforderung für die Sicherung und Entwicklung einer kosten und ressourceneffizienten Abwasserinfrastruktur. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Förderkennzeichen 370816305, Umweltbundsamt, Dessau-Roßlau, UBA-Texte 36/2010.
- Hoffmann, L. (2016): Prognosemodell zur zukünftigen Entwicklung der Gebühren in der Siedlungswasserwirtschaft in Mecklenburg-Vorpommern unter Einfluss des Demografischen Wandels. Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur für Wasserwirtschaft, Masterthesis, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur für Wasserwirtschaft.
- Holländer, H.; Zenker, C.; Ammermüller, B.; Geyler, S.; Lautenschläger, S. (2008): Trinkwasserpreise in Deutschland – Welche Faktoren begründen regionale Unterschiede? Gutachten, Universität Leipzig, Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement.
- Hong, H. P. (1997): Reliability based optimal inspection and maintenance for pipeline under corrosion. In: *Civil Engineering Systems* (14), S. 313–334.
- Horn, J. von; Maurer, M.; Londong, J.; Lautenschläger, S.; Steinmetz, H.; Hillenbrand, T.; Dockhorn, T. (2013): Welche neuartigen Sanitärsysteme (NASS) sind für Deutschland besonders Erfolg versprechend? In: *KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 60 (8), S. 673–683.
- Horstmeyer, N.; Rapp-Fiegle, S.; Helmreich, B.; Drewes, J.E (2014): Kosten der Abwasserbehandlung: Finanzierung, Kostenstrukturen und Kostenkenndaten der Bereiche Kanal, Sonderbauwerke und Kläranlagen. 1. Aufl., München: Deutscher Industrieverlag. ISBN: 978-3-83567-258-4.
- Huang, M.; Juo, J.; Fu, T. (2015): Metafrontier cost Malmquist productivity index: an application to Taiwanese and Chinese commercial banks. In: *Journal of Productivity Analysis*, 44 (3), S. 321–335.

- hr/>
- Hubner, B. (2014): Demografie - Infarktisiko oder Phantomschmerz der Wasserwirtschaft. In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall: Demografischer Wandel - Zukunftsfähige Abwasserkonzepte. Hennef, S. 201-220.
- Imhoff, K.; Imhoff, K. R. (2007): Taschenbuch der Stadtentwässerung. München: Oldenbourg-Verlag. ISBN: 978-3-83563-094-9.
- Jacobs, P.; Karney, B. (1994): GIS development with application to cast iron water main breakage rates. In: Proceedings of 2nd International Conference on Water Pipeline Systems, London: Edinburgh. Mechanical Engineering Publication Ltd.
- Jansen, K. (2012): AQUA-WertMin 7.3.01-150101: Programmhandbuch für ein Alterungs - und Zustandsprognosemodell zur Erarbeitung von strategischen Kanalsanierungsplanungen zur langfristigen Substanzwerterhaltung. Sachverständigenbüro für Kanalsanierung, Kleinbittersdorf.
- Jeppsson, U.; Alex, J.; Batstone, D. J.; Benedetti, L.; Comas, J.; Copp, J. B. et al. (2013): Benchmark simulation models, quo vadis? In: Water Science and Technology, 68 (1), S. 1–15.
- Jeppsson, U.; Pons, M-N; Nopens, I.; Alex, J.; Copp, J. B.; Gernaey, K. V. et al. (2007): Benchmark simulation model no 2: general protocol and exploratory case studies. In: Water Science and Technology, 56 (8), S. 67–78.
- Jimenez, J.; Grelier, P.; Meinhold, J.; Tazi-Pain, A. (2010): Biological modelling of MBR and impact of primary sedimentation. In: Desalination, 250 (2), S. 562–567.
- Jones, D. (1997a): Inspection: the key to a reliable future - part 1. In: Pipes and Pipelines International, 42 (2), S. 32–43.
- Jones, D. (1997b): Inspection: the key to a reliable future - part 2. In: Pipes and Pipelines International, 42 (3), S. 22–26.
- Jones, G. L. (1978): A mathematical model for bacterial growth and substrate utilisation in the activated-sludge process. In: In: James, A. (Hg.): Mathematical Models in Water Pollution Control. New Jersey (USA): John Wiley and Sons, S. 265–279,
- Jones, R.; Takács, I. (2004): Modeling the impact of anaerobic digestion on the overall performance of biological nutrient removal wastewater treatment plant. In: Proceedings of the Water Environment Federation 77th Annual Technical Exhibition & Conference, 2.-6. October, New Orleans (USA).
- Jones, R. M.; Dold, P. L.; Takács, I.; Chapman, K.; Wett, B.; Murthy, S.; O'Shaughnessy, M. (2007): Simulation for operation and control of reject water treatment processes. In: Proceedings of the Water Environment Federation 80th Annual Technical Exhibition & Conference, 13.–17. October, San Diego (USA).
- Kegebein, J. (2006): Die Verwendung von Küchenabfallzerkleinerern (KAZ) aus abwasser- und abfallwirtschaftlicher Sicht. Universität Karlsruhe, Siedlungswasserwirtschaft, Schriftenreihe SWW, Band 122. ISBN: 978-3-98093-835-2.
- Kettler, A. J.; Goulter, L. C. (1985): An Analysis of Pipe Breakage in Urban Water Distribution Networks. In: Canadian Journal Civil Engineering, 12 (2), S. 286–293.
- Kirbach, R. (2009): Cross-Border-Leasing: Für dumm verkauft. In: Die Zeit vom 12.03.2009,
- Kirchheim, N. (2005): Kanalablagerungen in der Mischwasserkanalisation. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.

- Kleiner, Y.; Sadiq, R.; Rajani, B. B. (2006): Modeling the Deterioration of Buried Infrastructure as a Fuzzy Markov Process. In: *Journal of Water Supply Research and Technology - AQUA*, 55, S. 67–80.
- Kleiner, Y.; Rajani, B. (2001): Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models. In: *Urban Water*, 3 (3), S. 131–150.
- Kley, G.; Caradot, N. (2013): Review of Sewer Deterioration Models - Project Acronym: SEMA. Report, Kompetenzzentrum Wasser Berlin GmbH, Department Surface Water, Berlin.
- Klinkenberg, A. (2007): Organisationsveränderungen in der kommunalen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung: Beschreibung und Interpretation von institutionellen Anpassungen der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Deutschland an sich ändernde Umfeldfaktoren. Universität Duisburg-Essen, Fachbereich für Gesellschaftswissenschaften.
- Kluge, T.; Scheele, U. (2008): Von dezentralen zu zentralen Systemen und wieder zurück? Räumliche Dimensionen des Transformationsprozesses in der Wasserwirtschaft. In: Moss, T.; Naumann, W.; Wissen, M. (Hg.): *Infrastrukturnetze und Raumentwicklung*. München: oekom-Verlag.
- Kluge, T.; Libbe, J. (2006): Transformation netzgebundener Infrastruktur - Strategien für Kommunen am Beispiel Wasser. *Difu-Beiträge zur Stadtforschung*, Berlin, Band 45.
- König, A. (2005): CARE-S WP2 External corrosion model description. Report, SINTEF Technology and Society, Trondheim (Norway).
- Koziol, M. (2007): Anpassung der technischen Infrastruktur beim Stadtumbau. Gemeinschaftstagung des DStT und der DWA, 8.-9. Mai, Weimar.
- Koziol, M.; Veit, A.; Walther, J. (2006): Stadtumbau Ost-Anpassung der technischen Infrastruktur - Erkenntnisstand, Bewertung und offene Fragen. Reihe "Werkstatt: Praxis" des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, Bonn, Heft 41.
- Kröhnert, S.; Kuhn, E.; Karsch, M.; Klingholz, R. (2011): Die Zukunft der Dörfer - Zwischen Stabilität und demografischem Niedergang. Institut für Bevölkerung und Entwicklung, Berlin.
- Kulkarni, R. B.; Golabi, K.; Chuang, J. (1986): Analytical techniques for selection of repair-or-replace options for cast iron gas piping systems - Phase I. Research Institute, Chicago (USA).
- Langergraber, G.; Rieger, L.; Winkler, S.; Alex, J.; Wiese, J.; Owerdieck, C. et al. (2004): A guideline for simulation studies of wastewater treatment plants. In: *Water Science and Technology*, 50 (7), S. 131–138.
- Larsen, T. A.; Udert, K. M.; Lienert, J. (2013): Source separation and decentralization for wastewater management. London: IWA Publishing. ISBN: 978-1-78040-107-8.
- Lauwers, J.; Appels, L.; Thompson, I. P.; Degève, J.; van Impe, J. F.; Dewil, R. (2013): Mathematical modelling of anaerobic digestion of biomass and waste: Power and limitations. In: *Progress in Energy and Combustion Science*, 39 (4), S. 383–402.
- Lawless, J. F. (2003): Statistical models and methods for lifetime data. 2. Aufl., New Jersey (USA): Wiley Series in Probability and Statistics. ISBN: 978-0-47137-215-8.
- LBS (2018): Markt für Wohnimmobilien 2018. Bundesgeschäftsstelle der Landesbausparkassen, Berlin.
- Le Gat, Y. (2008): Modelling the deterioration process of drainage pipelines. In: *Urban Water Journal*, 5 (2), S. 97–106.

- Lei, J. (1997): Statistical approach for describing lifetimes of water mains - Case Trondheim Municipality. Report, SINTEF Civil and Environmental Engineering, Trondheim (Norway).
- Lindtner, S. (2008): Leitfaden für die Erstellung eines Energiekonzeptes kommunaler Kläranlagen. Lebensministerium, Wien.
- Linkens, D.; Shetty, N. K.; Blio, M. (1998): A probabilistic approach to fracture assessment of onshore gas-transmission pipelines. In: Pipes and Pipelines International, 43 (4), S. 5–16.
- Liwerska-Bizukoje, E.; Biernacki, R. (2010): Identification of the most sensitive parameters in the activated sludge model implemented in BioWin software. In: Bioresource technology, 101 (19), S. 7278–7285.
- Londong, J.; Hillenbrand, T.; Niederste-Hollenberg, J. (2011): Demografischer Wandel: Anlass und Chance für Innovationen in der Wasserwirtschaft. In: KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall, 58 (2), S. 152–158.
- Lorenzo-Toja, Y.; Vázquez-Rowe, I.; Marín-Navarro, D.; Crujeiras, R. M.; Moreira, M. T.; Feijoo, G. (2018): Dynamic environmental efficiency assessment for wastewater treatment plants. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, 23 (2), S. 357–367.
- LPB M-V (2016): Flüchtlinge in Mecklenburg-Vorpommern: 20 Fragen und Antwort. 2. Aufl., Landeszentrale für politische Bildung Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- LRH M-V (2004): Bericht nach §88 Abs. 5 LHO zur Abwasserentsorgung in Mecklenburg-Vorpommern. Hg. v. Landesrechnungshof Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- LU (2006): Abwasserteichanlagen zur kommunalen Abwasserreinigung - Hinweise zu Planung, Bau, Betrieb und Organisation. Landesamt für Umwelt Sachsen-Anhalt, Fachbereich 2, Abfallwirtschaft, Bodenschutz, Anlagentechnik, Wasserwirtschaft, Magdeburg.
- Mahmoudi, M. J.; Fathi, B.; Sajadifar, H.; Shahsavari, A. (2012): Measuring Efficiency of Water and Wastewater Company: A DEA Approach. In: Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 4 (12), S. 1642–1648.
- Mahro, B. (2006): Zur Bedeutung des Nitratsauerstoffs bei der biologischen Abwasserreinigung. In: KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall, 53, S. 916–919.
- Marks, D. H.; Andreou, S. A.; Jeffrey, L. A.; Park, C.; Zaslavski, A. (1987): Statistical models for water main failures. US Environmental Protection Agency, Co-operative Agreement CR8 1 0558.
- Marks, D. H.; Jeffrey, L. A. (1985): Predicting urban water distribution maintenance strategies: A case study of New Haven Connecticut. US Environmental Protection Agency, Co-operative Agreement R8 1 0558-01-0.
- Marlow, D.; Davis, P.; Trans, D.; Beale, D.; Burn, S. (2009): Remaining asset life: A state of the art review. Water Environment Research Fundation (WERF), Alexandria (USA).
- Marques, R.; Monteiro, A. (2004): Benchmarking the Economic Performance of Portuguese Water and Sewerage Services. In: Emrouznejad, A. and Podinovski, V. (Hg.): Data Envelopment Analysis and Performance Measurement. Canley (UK): Warwick Print, S. 65-72.
- Marques, R.; Monteiro, A. (2001): Application of performance indicators in water utilities management - A case-study in Portugal. In: Water Science and Technology, 44 (2-3), S. 95–102.
- Marques, R. C.; Witte, K. (2010): Towards a benchmarking paradigm in European water utilities. In: Public Money & Management, 30 (1), S. 42–48.

- Marsaglia, G.; Tsang, W. W. (2000): The ziggurat method for generating random variables. In: *Journal of statistical software*, 5 (8), S. 1–7.
- Marsaglia, G.; Tsang, W. W. (1984): A Fast, Easily Implemented Method for Sampling from Decreasing or Symmetric Unimodal Density Functions. In: *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 5 (2), S. 349–359.
- Matos, R.; Cardoso, A.; Duarte, P.; Ashley, R.; Molinari, A.; Schulz, A. (2003): Performance indicators for wastewater services - towards a manual of best practice. In: *Water Science and Technology: Water Supply*, 3 (1-2), S. 365–371.
- Mattsson, J.; Hedström, A.; Ashley, R. M.; Viklander, M. (2015): Impacts and managerial implications for sewer systems due to recent changes to inputs in domestic wastewater – A review. In: *Journal of Environmental Management*, 161, S. 188–197.
- Mavin, K. (1996): Predicting the failure performance of individual water mains. Report, Urban Water Research Association of Australia Research, Melbourne (Australia), No. 114.
- Mayo, A. W.; Abbas, M. (2014): Removal mechanisms of nitrogen in waste stabilization ponds. In: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 72-75, S. 77–82.
- Mbamba, C. K.; Flores-Alsina, X.; Bastone, D. J.; Tait, S. (2016): Validation of a plant-wide phosphorus modelling approach with minerals precipitation in a full-scale WWTP. In: *Water Research*, 100, S. 169–183.
- McMullen, L. D. (1982): Advanced concepts in soil evaluation for exterior pipeline corrosion. In: *Proceeding of the AWWA Annual Conference*, 16-20. May, Miami (USA).
- Mehle, J. J.; O’Keefe, S. M.; Wrase, P. E. (2001): An examination of methods for condition rating of sewer pipelines. University of Minnesota, Center for Development of Technical Leadership, Minnesota (USA).
- MEID M-V (2019): 5. Bevölkerungsprognose Mecklenburg-Vorpommern bis 2040: Landesprognose. Hg. v. Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- MEIL M-V (2012): Aktualisierte 4. Landesprognose zur Bevölkerungsentwicklung in Mecklenburg-Vorpommern bis 2030: Aktualisierung der 4. Landesprognose auf das Basisjahr 2010. Ministerium für Energie, Infrastruktur und Landesentwicklung Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- Metropolis, N.; Stanislaw, U. (1949): The monte carlo method. In: *Journal of the American statistical association*, 44 (247), S. 335–341.
- Micevski, T.; Kuszer, G.; Coombes, P. (2002): Markov model for storm water pipe deterioration. In: *Journal of Infrastructure Systems*, 8 (2), S. 49–56.
- Milathianakis, E. (2017): Modellierung und future performance assessment of Duvbacken wastewater treatment plant. Masterthesis, School of Architecture and the Built Environment (ABE), Land and Water Resources Engineering, Stockholm (Sweden).
- Minkner, A. (1994): Kreise und andere Kommunalverbände. In: Klemisch, H. et al. (Hg.): *Handbuch für alternative Kommunalpolitik*. Bielefeld, S. 59 ff.
- MKULNV (2014): Kanalsanierung: Entwicklung innovativer Konzeptionen und Verfahren zur Sanierung von öffentlichen und privaten Kanälen mit dem Schwerpunkt

- Grundstücksentwässerung. Abschlussbericht, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Aachen.
- MLUL (2015): Abschlussbericht - Leitbild zukunftsfähige Siedlungswasserwirtschaft Brandenburg. Hg. v. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft Brandenburg, Potsdam.
- MLUV M-V (2013): Zukunftsfähige Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern. Hg. v. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- MLUV M-V (2009): Zustand der Abwasserkanalisation in Mecklenburg-Vorpommern. Hg. v. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- MLUV M-V (2008): Kommunale Abwasserbeseitigung in Mecklenburg-Vorpommern: Heute und nach Abschluss der EU-Förderperiode 2007-2013. Hg. v. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- Moler, C. B. (2004): Numerical Computing with Matlab. Society for Industrial and Applied Mathematics. ISBN: 978-0-89871-660-3.
- Molinos-Senante, M.; Donoso, G.; Sala-Garrido, R. (2016a): Assessing the efficiency of Chilean water and sewerage companies accounting for uncertainty. In: Environmental Science & Policy, 61, S. 16–123.
- Molinos-Senante, M.; Hernández-Sancho, F.; Sala-Garrido, R. (2011): Cost-benefit analysis of water-reuse projects for environmental purposes: a case study for Spanish wastewater treatment plants. In: Journal of Environmental Management, 92, S. 3091–3097.
- Molinos-Senante, María; Maziotis, Alexandros; Sala-Garrido, Ramon (2017): Assessing the productivity change of water companies in England and Wales: A dynamic metafrontier approach. In: Journal of Environmental Management, 197, S. 1–9.
- Molinos-Senante, María; Gémar, Germán; Gómez, Trinidad; Caballero, Rafael; Sala-Garrido, Ramón (2016b): Eco-efficiency assessment of wastewater treatment plants using a weighted Russell directional distance model. In: Journal of Cleaner Production, 137, S. 1066–1075.
- Molinos-Senante, María; Sala-Garrido, Ramón; Lafuente, Matilde (2015): The role of environmental variables on the efficiency of water and sewerage companies: a case study of Chile. In: Environmental Science and Pollution Research, 22 (13), S. 10242–10253.
- Möller, S. (2016): Entwurf und Bewertung von Abwasserentsorgungskonzepten für den ländlichen Raum zur Anpassung an zukünftige Herausforderungen anhand zweier Fallbeispiele in Mecklenburg-Vorpommern. Masterthesis, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur für Wasserwirtschaft.
- Moody, L. F. (1944): Friction factors for pipe flow. In: The American Society of Mechanical Engineers (66), S. 671–684.
- MRI NRW (2017): Richtlinien über die Gewährung von Zuwendungen für eine „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW II“. Runderlass des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz, IV-7-025 089 0010 vom 10. April, Düsseldorf.



- MULEWF (2014): Umstellung von Kläranlagen auf Schlammfäulung: Energetisches und ökonomisches Optimierungspotential. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz.
- Munch, C.; Kuschik, P.; Roske, I. (2005): Root stimulated nitrogen removal: only a local effect or important for water treatment? In: *Water Science and Technology*, 51, S. 185–192.
- Murnleitner, E.; Kuba, T.; van Loosdrecht; M. C. M.; Heijnen, J. J. (1997): An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorous removal. In: *Biotechnology and Bioengineering*, 54 (5), S. 434–450.
- MUVE BW (2003): Leitfaden Kooperationen und Fusionen in der Wasserversorgung: Betriebswirtschaft/ Recht/ Steuern. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart.
- National Research Council (2010): Framework for assessment of state, performance and management of Canada's core public infrastructure. Final Report B5332.5, Ottawa (Canada).
- National Water Commission (2012): National performance report 2010–2011: Urban water utilities. Australian Government, Canberra (Australia).
- Neumann, Marc B.; Vanrolleghem, P. A. (Hg.) (2011): Use of Variance decomposition in the early stages of WWTP design. In: *Proceedings of the 11th IWA Specialised Conference on Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants*, 4-8. September, Budapest.
- Nicola, D. J. (2013): Environmental Impact Bonds - Working Paper # 1. Duke University, The Fuqua School of Business, New York.
- Nikuradse, J. (1933): Strömungsgesetze in rauen Rohren. In: Düsseldorf: VDI-Verlag, VDI Forschungsheft, Heft 361,
- Nolan, P. J. (2007): *Stable Distributions: Models for Heavy-Tailed Data*. Basel: Birkhauser Verlag. ISBN: 978-0-81764-159-9.
- Nopens, I.; Benedetti, L.; Jeppsson, U.; Pons, M.-N.; Alex, J.; Copp, J. B. et al. (2010): Benchmark Simulation Model No 2: finalisation of plant layout and default control strategy. In: *Water Science and Technology*, 62 (9), S. 1967–1974.
- Nopens, I.; Batstone, D. J.; Copp, J. B.; Jeppsson, U.; Volcke, E.; Alex, J.; Vanrolleghem, P. A. (2009): An ASM/ADM model interface for dynamic plant-wide simulation. In: *Water Research*, 43 (7), S. 1913–1923.
- Nowack, M.; John, S.; Tränckner, J.; Günther, E. (2010): Die Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Abwassergebühren. In: *GWF Wasser-Abwasser*, 51 (11), S. 1076–1085.
- OECD (2003): Key issues and recommendations for consumer protection: affordability, social protection and public participation in urban water sector reform in eastern europe, caucasus and central asia. Organisation for economic co-operation and development, Paris.
- Office of Water Services (2012): Key performance indicators - guidance. OFWAT - Office of Water Services (UK), URL: <https://www.ofwat.gov.uk/publication/key-performance-indicators-guidance/>, (zuletzt geprüft Sept. 2019).
- Pandey, M. D. (1998): Probabilistic models for condition assessment of oil and gas pipeline. In: *NDT & E International* (5), S. 349–358.

- Perold, A. F. (2004): The Capital Asset Pricing Model. In: *Journal of Economic Perspectives*, 18 (3), S. 3–24.
- Phillips, H. M.; Sahlstedt, K. E.; Frank, K.; Bratby, J.; Brennan, W.; Rogowski, S. et al. (2009): Wastewater treatment modelling in practice: a collaborative discussion of the state of the art. In: *Water Science and Technology*, 59 (4), S. 695–704.
- Quaas, M. (1997): *Kommunales Abgabenrecht*. München: Beck Verlag, *Praxis des Verwaltungsrechts*, Band 13. ISBN: 978-3-40642-533-2.
- Quadros, S.; João Rosa, M.; Alegre, H.; Silva, C. (2010): A performance indicators system for urban wastewater treatment plants. In: *Water Science and Technology*, 62 (10), S. 2398–2407.
- Quadros, S.; Rosa, M. J.; Alegre, H. (2009): Performance assessment of urban wastewater treatment plants: state-of-the-art and proposal of a PI system for overall performance assessment. Technical report, LNEC, Lisbon, Report 258/2009.
- Ráduly, B.; Gernaey, K. V.; Capodaglio, A. G.; Mikkelsen, P. S.; Henze, M. (2007): Artificial neural networks for rapid WWTP performance evaluation: Methodology and case study. In: *Environmental Modelling & Software*, 22 (8), S. 1208–1216.
- Rajani, B.; Kleiner, Y. (2001): Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. In: *Urban Water*, 3 (3), S. 151–164.
- Rajani, B.; Makar, J. M. (2000): A methodology to estimate remaining service life of grey cast iron water mains. In: *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27 (6), S. 1259–1272.
- Randall-Smith, M.; Russell, A.; Oliphant, R. (1992): Guidance manual for the structural condition assessment of the trunk mains. Water Research Centre, Swindon (UK).
- Rehan, R.; Unger, A.; Knight, M. A.; Haas, C. (2015): Strategic Water Utility Management and Financial Planning Using a New System Dynamics Tool. In: *Journal - American Water Works Association*, 107 (1), S. 22–36.
- Rehan, R.; Knight, M. A.; Unger, A. J. A.; Haas, C. T. (2014a): Financially sustainable management strategies for urban wastewater collection infrastructure – Development of a system dynamics model. In: *Tunnelling and Underground Space Technology*, 39, S. 116–129.
- Rehan, R.; Unger, A. J. A.; Knight, M. A.; Haas, C. T. (2014b): Financially sustainable management strategies for urban wastewater collection infrastructure – Implementation of a system dynamics model. In: *Tunnelling and Underground Space Technology*, 39, S. 102–115.
- Rehan, R.; Knight, M. A.; Unger, A. J. A.; Haas, C. T. (2013): Development of a system dynamics model for financially sustainable management of municipal watermain networks. In: *Water Research*, 47 (20), S. 7184–7205.
- Rehan, R.; Knight, M. A.; Haas, C. T.; Unger, A. J. A. (2011): Application of system dynamics for developing financially self-sustaining management policies for water and wastewater systems. In: *Water Research*, 45 (16), S. 4737–4750.
- Rehm, H.; Matern-Rehm, S. (2010): *Kommunal финанzen*. 1. Aufl., Berlin: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-531-15593-7.
- Ribes, J.; Ferrer, J.; Bouzas, A.; Seco, A. (2002): Modelling of an activated primary settling tank including the fermentation process and VFA elutriation. In: *Environmental Technology*, 23 (10), S. 1147–1156.

- Rieger, L.; Koch, G.; Kühni, W.; Gujer, W.; Siegrist, H. (2001): The eawag bio-p module for activated sludge model no. 3. In: *Water Research*, 35 (16), S. 3887–3903.
- Ristenpart, E. (1995): Feststoffe in der Mischwasserkanalisation: Vorkommen, Bewegung und Verschmutzungspotential. Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Hannover: SuG-Verlagsgesellschaft, Heft 11.
- Rivas, A.; Irizar, I.; Ayesa, E. (2008): Model-based optimisation of wastewater treatment plants design. In: *Environmental Modelling & Software*, 23 (4), S. 435–450.
- Robert, C. P.; Casella, G. (2010): Monte Carlo statistical methods. 2. Aufl., New York: Springer Texts in Statistics. ISBN: 978-1-47574-145-2.
- Roberts, J. (2009): Das Wasserwerk als Sicherheit für Spekulanten - Julia Roberts über Verträge zum Cross-Border-Leasing. In: *Südwestdeutsche Zeitung - Stuttgarter Zeitung* vom 03.01.2009 (2).
- Rosen, C.; Jeppsson, U.; Vanrolleghem, P. A. (2004): Towards a common benchmark for long-term process control and monitoring performance evaluation. In: *Water Science and Technology*, 50 (11), S. 41–49.
- Rösler, P.; Mackenthun, T.; Pohl, R. (2002): Handbuch Kreditgeschäft. 6. Aufl., Wiesbaden: Gabler-Verlag. ISBN: 978-3-322-90346-4.
- Ross, S. M. (2014): Introduction to probability models. 11. Aufl., San Diego (USA): Academic Press. ISBN: 978-0-12407-948-9.
- Rotta, J. (1956): Experimenteller Beitrag zur Entstehung turbulenter Strömung im Rohr. In: *Ingenieur-Archiv*, 24, S. 258–281.
- Ruano, M. R.; Ribes, J.; Pauw, D. J. W de; Sin, G. (2007): Parameter subset selection for the dynamic calibration of Activated Sludge Models (ASMs): Experience versus systems analysis. In: *Water Science and Technology*, 56 (8), S. 107–115.
- Rubinstein, R. Y.; Kroese, D. P. (2017): Simulation and the Monte Carlo method. 3. Aufl., New Jersey (USA): Wiley Series in Probability and Statistics. ISBN: 978-1-11863-220-8.
- Rügemer, W. (2005): Cross-Border-Leasing: Ein Lehrstück zur globalen Enteignung der Städte. 2. Aufl., Münster: Westfälisches Dampfboot. ISBN: 978-3-89691-568-9.
- Rügemer, W. (2004): Wie fiktive Kapitalbildung zur realen Auszehrung des öffentlichen Sektors führt. In: *Kurswechsel: Zeitschrift für gesellschafts-, wirtschafts- und umweltpolitische Alternativen* (3/2004), S. 54–61.
- Ruwanpura, J.; Ariaratnam, S. T.; El-Assaly, A. (2004): Pre-Prediction models for sewer infrastructure utilizing rule-based simulation. In: *Civil Engineering and Environmental Systems*, 21 (3), S. 169–185.
- Sabri, D.; Yassine, D.; Yahia, H.; Dounia, M. (2017): Dynamic simulation for wastewater treatment plants management: Case of Souk-Ahras region, north-eastern Algeria. In: *Journal of Water and Land Development*, 34 (1), S. 221–231.
- Sala-Garrido, R.; Molinos-Senante, M.; Hernández-Sancho, F. (2011): Comparing the efficiency of wastewater treatment technologies through a DEA metafrontier model. In: *Chemical Engineering Journal*, 173 (3), S. 766–772.
- Salman, B. (2010): Infrastructure Management and Deterioration Risk Assessment of Wastewater Collection Systems. Dissertation, University of Cincinnati (USA).

- Schade, H.; Kunz, E.; Vagt, J.-D. (1989): Strömungslehre: Mit einer Einführung in die Strömungsmeßtechnik. 2. Aufl., Berlin: De-Gruyter-Lehrbuch. ISBN: 978-3-11011-873-4.
- Scheer, H.; Schlegel, S. (2008): Betriebliche Optimierung unterbelasteter Kläranlagen. In: KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall, 55 (12), S. 1314–1322.
- Scheidegger, A.; Hug, T.; Rieckermann, J.; Maurer, M. (2011): Network condition simulator for benchmarking sewer deterioration models. In: Water Research, 45 (16), S. 4983–4994.
- Schiffler, M. (2015): Water, politics and money: A reality check on privatization. Cham. ISBN: 978-3-31916-690-2.
- Schiller, G. (2010): Kostenbewertung der Anpassung zentraler Abwasserentsorgungssysteme bei Bevölkerungsrückgang. Leibnitz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V., Berlin: Rhombos-Verlag, IÖR Schriften, Band 51. ISBN: 978-3-941216-70-9.
- Schmid-Schmieder, V. (1994): Container-Kläranlagen - die Lösung für weitgehend dezentrale Abwasserentsorgungskonzepte? In: KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall, 41 (3), S. 412–415.
- Schmidt, T. (2009): Modellierung von Kanalalterungsprozessen auf der Basis von Zustandsdaten. Dissertation, Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau.
- Scholz, R.; Rößger, F.; Krefl, D.; Steinberg, J.; Dobhammer-Reiter, G. (2008): Bevölkerungsprognose für Mecklenburg-Vorpommern auf Kreisebene bis zum Jahr 2030: Annahmen und Ergebnisse der 10. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. In: Statistisches Bundesamt, Diskussionspapier No. 22, Wiesbaden,
- Scholz, R.; Pitschas, R. (1982): Gemeindegewirtschaft zwischen Verwaltungs- und Unternehmensstruktur: Rechts- und Organisationsfragen zur modernen Wirtschaftsführung von gemeindlichen Eigenbetrieben. Berlin: Duncker & Humblot, Schriften zum öffentlichen Recht, Band 416. ISBN: 978-3-42805-146-7.
- Schönherr, F. (2003): Kanalablagerungen und ihre Bedeutung für den Schmutzstoffaustrag aus Kanalisationen. Diplomarbeit, Fridericiana Universität zu Karlsruhe, Institut Siedlungswasserwirtschaft.
- Schreff, D. (2010): Anaerobe Schlammstabilisierung. Kläranlagen wirtschaftlich betreiben. In: wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik, 10, S. 13–16.
- Schuster, C. (2007): Mechanische Klärschlammbehandlung. In: Chemie Ingenieur Technik, 79 (11), S. 1871–1881.
- Seco, A.; Ribes, J.; Serralta, J.; Ferrer, J. (2004): Biological nutrient removal model No.1 (BNRM1). In: Water Science and Technology, 50 (6), S. 69–70.
- Sedory, P.; Stenstrom, M. K. (1995): Dynamic Prediction of Wastewater Aeration Basin Temperature. In: Journal of Environmental Engineering, 121 (9), S. 609–618.
- Shamir, U.; Howard, C. D. D. (1979): An analysis of water main pipe breaks in the City of Malmö, Sweden. In: Journal of AWWA, 71 (5), S. 248–258.
- Simon, R.; Hanke, B.; Honeck, V. (2017): Kläranlagen in den Energiemärkten von heute und morgen. Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Tagungsbuch der Fachtagung "Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren & Flexibilität wagen", 30. November, Kaiserslautern, S. 115-126.

- Sindhe, V. R.; Hirayama, N.; Mugita, A.; Itoh, S. (2013): Revising the existing performance indicator system for small water supply utilities in Japan. In: *Urban Water Journal*, 10 (6), S. 377–393.
- Sin, G.; Vanrolleghem, P. A. (2007): Extensions to modeling aerobic carbon degradation using combined respirometric-titrimetric measurements in view of activated sludge model calibration. In: *Water Research*, 41 (15), S. 3345–3358.
- Sin, G.; van Hulle, S. W. H.; de Pauw, D. J. W.; van Griensven, A.; Vanrolleghem, P. A. (2005): A critical comparison of systematic calibration protocols for activated sludge models: a SWOT analysis. In: *Water Research*, 39 (12), S. 2459–2474.
- Singh, M.; Mittal, A. K.; Upadhyay, V. (2014): Efficient water utilities: use of performance indicator system and data envelopment analysis. In: *Water Science and Technology: Water Supply*, 14 (5), S. 787–794.
- Sommer, B. (2004): Bevölkerungsentwicklung in den Bundesländern bis 2050: Annahmen und Ergebnisse der 10. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Stahre, P.; Adamsson, J.; Mellstrom, G. (2008): A new approach for assessment of the performance of water distribution and sewerage networks. In: *Proceedings of the International Conference on Performance Assessment of Urban Infrastructure Services, Drinking Water, Wastewater and Solid Waste*, March, Valencia (Spain), IWA Publishing. ISBN: 978-1-84339-191-0.
- StatA M-V (2017): Statistische Berichte: Bevölkerungsentwicklung der Kreise und Gemeinden in Mecklenburg-Vorpommern 2014: Korrigierte Ausgabe. Statistischer Bericht A113 2014 00, Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- StatA M-V (2016a): Statistische Berichte: Bodenflächen nach Art der tatsächlichen Nutzung in Mecklenburg-Vorpommern 2014. Statistischer Bericht F243 2014 00, Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- StatA M-V (2016b): Statistische Berichte: Bruttolöhne und -gehälter sowie Arbeitnehmerentgelt der Wirtschaftsbereiche in den kreisfreien Städten und Landkreisen Mecklenburg-Vorpommerns 2000-2014: Ergebnisse nach Revision 2014. Statistischer Bericht P223 2014 00, Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- StatA M-V (2016c): Statistische Berichte: Primäreinkommen und verfügbares Einkommen der kreisfreien Städte und Landkreise Mecklenburg-Vorpommerns 2000 bis 2014. Ergebnisse nach Revision 2014. Statistischer Bericht P233 2014 00, Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- StatA M-V (2015): Statistische Berichte: Bestand an Wohngebäuden und Wohnungen in Mecklenburg-Vorpommern 2014. Statistischer Bericht C193 2014 00, Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- StatA M-V (2012a): Erhebung der öffentlichen Abwasserbehandlung 2010 (Datensatz). Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- StatA M-V (2012b): Erhebung der öffentlichen Abwasserentsorgung 2010 (Datensatz). Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- StatA M-V (2011a): Erhebung der öffentlichen Wasserversorgung 2010 (Datensatz). Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.

- StatA M-V (2011b): Statistische Berichte: Wasser- und Abwasserentgelte für die öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Mecklenburg-Vorpommern 2010. Statistischer Bericht Q193 2010 01, Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.
- StatBA (2019): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- StatBA (2018): Verdienste und Arbeitskosten: Arbeitnehmerverdienste: Lange Reihen, 1. Vierteljahr 2018. Fachserie 16 Reihe 2.4, Statistisches Bundesamt (DESTATIS), Wiesbaden.
- StatBA (2017a): Laufende Wirtschaftsrechnungen: Einkommen, Einnahmen und Ausgaben privater Haushalte 2015. Fachserie 15 Reihe 1, Statistisches Bundesamt (DESTATIS), Wiesbaden.
- StatBA (2017b): Preise: Verbraucherpreisindizes für Deutschland - Lange Reihen ab 1948. Artikelnummer: 5611103161124, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- StatBA (2017c): Preisindizes für die Bauwirtschaft. Fachserie 17 Reihe 4, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- StatBA (2015): Bevölkerungsentwicklung in den Bundesländern bis 2060: Ergebnisse der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Artikelnummer: 5124205159004, Statistisches Bundesamt (DESTATIS), Wiesbaden,
- StatBA (2013): Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung -Öffentliche Wasserversorgung. Fachserie 19 Reihe 2.1.1, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- Steenbock, R. (2014): Gebühren- und Beitragsmodelle für die Abwasserbeseitigung in Zeiten des demografischen Wandels. In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: Demografischer Wandel - Zukunftsfähige Abwasserkonzepte. Hennef.
- Stephens, D. R. (1994a): Research seeks more precise corrosion defect assessment: part 1. In: Pipe Line Industry, 7, S. 45–49.
- Stephens, D. R. (1994b): Research seeks more precise corrosion defect assessment: part 2. In: Pipe Line Industry, 8, S. 52–55.
- Sterman, J. D. (2000): Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston (USA): McGraw-Hill Education. ISBN: 978-0-07238-915-9.
- Takács, I.; Patry, G. G.; Nolasco, D. (1991): A dynamic model of the clarification thickening process. In: Water Research, 25 (10), S. 1263–1271.
- Tchobanoglous, G.; Burton, F. L.; Stensel, H. D. (2013): Wastewater engineering: Treatment and reuse. 5. Aufl., Metcalf & Eddy, New York: McGraw-Hill Higher Education. ISBN: 978-0-07340-118-8.
- Tegner, H.; Rehberg, J. (2006): Öffentlich Private Partnerschaften - Lösungspotentiale für technische Infrastrukturen? In: Informationen zur Raumentwicklung, Heft 5/2006, S. 281-291.
- Teichgräber, B.; Hetschel, M. (2016): Bemessung der einstufigen biologischen Abwasserreinigung nach DWA-A 131. In: KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall, 63 (2), S. 97–102.
- Ten States Standards (2014): Recommended Standards for Wastewater Facilities - Policies for the Design, Review and Approval of Plans and Specifications for Wastewater Collection and Treatment Facilities. A report of the wastewater committee of the Great Lakes - Upper Mississippi River, Board of State and Provincial Public Health and Environmental Managers. Health Research, Inc., Health Education Services Division, Albany, New York.

- Theilen, U. (2014): Alternative Lösungen in kleinen Kommunen im städtischen Umfeld. In: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall - DWA: Demografischer Wandel - Zukunftsfähige Abwasserkonzepte. Hennef, S. 155-164.
- Theuretzbacher-Fritz, H.; Schielein, J.; Kiesel, H.; Kölbl, J.; Neunteufel, R.; Perfler, R. (2005): Transnational water supply benchmarking: The cross-border co-operation of the Bavarian EFFWB project and the Austrian OVGW project. In: *Water Supply*, 5 (6), S. 273–280.
- Thomas, P. (2011): The effects of food waste disposers on the wastewater system: a practical study. In: *Water and Environment Journal*, 25 (2), S. 250–256.
- TMLFUN (2012): Energieverbrauch und Energieerzeugung in Thüringer Kläranlagen: Bestandserhebung und Abschätzung von Einsparpotenzialen. Hg. v. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz, Erfurt.
- Tone, K.; Tsutsui, M. (2010): Dynamic DEA: A slacks-based measure approach. In: *Omega*, 38 (3), S. 145–156.
- Tone, K. (2001): A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. In: *European Journal of Operational Research*, 130 (3), S. 498–509.
- Tränckner, J.; Franz, T.; Frehmann, T.; Jathe, R.; Obermayer, A.; Winkler, U. (2014): Wirtschaftliche Auswirkungen sich überlagernder Entwicklungstrends auf Abwasserentsorgungsunternehmen. In: *KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 61 (9), S. 793–801.
- Tränckner, J. (2013): Auswirkungen des demografischen Wandels auf den Betrieb zentraler Abwassersysteme. Habilitation, Technische Universität Dresden, Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft.
- Tränckner, J.; Franz, T.; Winkler, U.; Obermayer, A.; Frehmann, T.; Jathe, R.; Freymuth, J. (2013): Wirtschaftliche Auswirkungen veränderlicher Rahmenbedingungen auf Abwasserentsorgungsunternehmen. In: *KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 60 (2), S. 111–120.
- Tran, D.; Perera, A. W. M.; Davis, P. (2006): Application of probabilistic neural networks in modeling structural deterioration of stormwater pipes. In: *Urban Water Journal*, 3 (3), S. 175–184.
- Tran, D. H.; Perera, B. J. C.; Ng, A. W. M. (2007): Neural network based prediction models for structural deterioration of urban drainage pipes. In: *Proceedings of the Conference of Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability*, 10-13. December, Christchurch (New Zealand).
- Trujillo, A. R. (1995): Bedarfsprognose und Strategieentwicklung für die Rehabilitation städtischer Wasserrohrnetze. Universität Karlsruhe, Institut für Städtebau und Landesplanung, Schriftenreihe, Heft 27.
- Tu, J. V. (1996): Advantages and disadvantages of using artificial neural networks versus logistic regression for predicting medical outcomes. In: *Journal of Clinical Epidemiology*, 49 (11), S. 1225–1231.
- U.S. EPA (2017): DC Water's Environmental Impact Bond: A First of its Kind. U.S. Environmental Protection Agency: Water Infrastructure and Resiliency Finance Center.
- UBA (2010): Demografischer Wandel als Herausforderung für die Sicherung und Entwicklung einer kosten- und ressourceneffizienten Abwasserinfrastruktur. Umweltbundesamt, Dessau, UBA-Texte 36/2010.

- van Loosdrecht, M. C. M.; Lopez-Vazquez, C. M.; Meijer, S. C. F.; Hooijmans, C. M. (2015): Twenty-five years of ASM1: Past, present and future of wastewater treatment modelling. In: *Journal of Hydroinformatics*, 17 (5), S. 697–718.
- van Veldhuizen, H. (1999): Modelling biological phosphorus and nitrogen removal in a full scale activated sludge process. In: *Water Research*, 33 (16), S. 3459–3468.
- Vanrolleghem, P. A.; Rosen, C.; Zaher, U.; Copp, J.; Benedetti, L.; Ayasa, E.; Jeppsson, Ulf (2005): Continuity-based interfacing of models for wastewater systems described by Petersen matrices. In: *Water Science and Technology*, 52 (1-2), S. 493–500.
- Vanrolleghem, P. A.; Spanjers, H.; Petersen, B.; Ginestet, P.; Takacs, I. (1999): Estimating (combinations of) activated sludge model no1 parameters and components by respirometry. In: *Water Science and Technology*, 39 (1), S. 195–214.
- Vanrolleghem, P. A.; Jeppsson, U.; Carstensen, J.; Carlsson, B.; Olsson, G. (1996): Integration of wastewater treatment plant design and operation - a systematic approach using cost functions. In: *Water Science and Technology*, 34 (3-4), S. 159–171.
- Verbände der Wasserwirtschaft (2015): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2015. ATT, BDEW, DBVW, DVGW, DWA, VKU, Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.
- Viegas, S. (2016): Activated sludge modeling of Vale Faro Waste Water Treatment Plant. Technische Universität Lissabon. URL: <https://fenix.technico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090415128/Artigo%20Sandra%20Viegas.pdf> (zuletzt geprüft Okt. 2019).
- Vogelgesang, K.; Lübking, U.; Jahn, H. (1997): Kommunale Selbstverwaltung: Rechtsgrundlagen - Organisation - Aufgaben. 2. Aufl., Berlin: Erich Schmidt Verlag. ISBN: 978-350304-055-2.
- Voica, M. C.; Panait, M.; Radulescu, I. (2015): Green investments - Between Necessity, Fiscal Constraints and Profit. In: *Procedia Economics & Finance*, 22, S. 72–79.
- Volcke, E.; van Loosdrecht, M. C. M.; Vanrolleghem, P. A. (2006): Continuity-based model interfacing for plant-wide simulation: A general approach. In: *Water Research*, 40 (15), S. 2817–2828.
- Walder, C.; Lindtner, S.; Proesl, A.; Klegraf, F.; Weissenbacher, N. (2013): WWTP design in warm climates - guideline comparison and parameter adaptation for a full-scale activated sludge plant using mass balancing. In: *Water Science and Technology*, 67 (1), S. 224–231.
- Walski, T. M.; Pelliccia, A. (1982): Economic analysis of water main breaks. In: *Journal of AWWA*, 74 (3), S. 140–147.
- Walther, S.; Milke, H.; Geyler, S.; Lautenschläger, S.; Holländer, R. (2013): Neuartige Sanitärsysteme als wirtschaftliche Alternative zur konventionellen dezentralen Entsorgung im ländlichen Raum. In: *KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 60 (12), S. 1054–1060.
- Wang, Q.; Hang, Y.; Sun, L.; Zhao, Z. (2016): Two-stage innovation efficiency of new energy enterprises in China: A non-radial DEA approach. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 112, S. 254–261.
- Wang, Q.; Zhao, Z.; Zhou, P.; Zhou, D. (2013): Energy efficiency and production technology heterogeneity in China: A meta-frontier DEA approach. In: *Economic Modelling*, 35, S. 283–289.



- Wang, S.; Qiu, S.; Ge, S.; Liu, J.; Peng, Z. (2018): Benchmarking Toronto wastewater treatment plants using DEA window and Tobit regression analysis with a dynamic efficiency perspective. In: *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (32), S. 32649–32659.
- Warfsmann, J. (1993): *Das Capital Asset Pricing Model in Deutschland*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. ISBN: 978-3-8244-0195-6.
- WEF (2009): *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*. 5. Aufl., WEF & ASCE, New York: McGraw-Hill, Manual of Practice, No. 8.
- Weisner, S. E. B.; Eriksson, P. G.; Graneli, W.; Leonardson, L. (1994): Influence of macrophytes on nitrate removal in wetlands. In: *Ambio*, 23, S. 363–366.
- Wendler, D.; Rosenwinkel, K.-H. (2003): Einflüsse von Küchenabfallzerkleinerern auf Kanalisation, Abwasserreinigung und anaerobe Schlammbehandlung. In: *KA-Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 50 (5), S. 596–605.
- Winkler, U. (2010): Berücksichtigung von demografischen und strukturellen Unsicherheiten bei der strategischen Kanalsanierungsplanung. In: *Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: Demografischer Wandel - Herausforderung für die Wasserwirtschaft*. Hennef, S. 159-169. ISBN: 978-3-941897-33-5.
- Wirahadikusumah, R.; Abraham, D.; Iseley, T. (2001): Challenging issues in modeling deterioration of combined sewers. In: *Journal of Infrastructure Systems*, 7 (2), S. 77–84.
- Wittling, A. (1996): Finanzierung und Werterhaltung von Kanälen: Rechtlich zulässige Finanzierungsmethoden, insbesondere Abschreibungen. In: *Umweltechnik Aktuell* (4).
- Wittmann, P. (2009): Riskante Geschäfte mit öffentlichem Eigentum. idw - Informationsdienst Wissenschaft, Pressemitteilung vom 28.09.2009, Leibnitz -Institut für Länderkunde. URL: <https://idw-online.de/de/news335932> (zuletzt geprüft Sept. 2019).
- Wöhe, G.; Döring, U. (2010): *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 24. Aufl., München: Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. ISBN: 978-3-80063-795-9.
- Yang, J. (2004): Road crack condition performance modeling using recurrent Markov chains and artificial neural networks. University of South Florida, College of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Zaher, U.; Li, R.; Jeppsson, U.; Steyer, J.-P.; Chen, S. (2009): GISCOD: general integrated solid waste co-digestion model. In: *Water Research*, 43 (10), S. 2717–2727.
- Zech, T.; Mohr, M.; Trösch, W. (2008): *Dezentrales Urbanes Infrastruktursystem DEUS 21. Schlussbericht*, Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Stuttgart, Förderkennzeichen 02WD0457.
- Zhong, W.; Yuan, W.; Li, S. X.; Huang, Z. (2011): The performance evaluation of regional R&D investments in China: An application of DEA based on the first official China economic census data. In: *Omega*, 39 (4), S. 447–455.
- Zhou, P.; Poh, K. L.; Ang, B. W. (2007): A non-radial DEA approach to measuring environmental performance. In: *European Journal of Operational Research*, 178 (1), S. 1–9.

## 11. Literaturverzeichnis

---

ZUSIE (2013): Regionale Entwicklungsszenarien in der Siedlungswasserwirtschaft unter den Bedingungen des Demografischen Wandels im Land Brandenburg. Arbeitsgemeinschaft ZUSIE - Zukunft für die Siedlungswasserwirtschaft in Brandenburg, Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, Potsdam.

# Anhang

## Anhang - Inhaltsverzeichnis

Anhang 1:	Inhalte des Abfrageformulars für die zusätzlichen beim Aufgabenträger abgefragten Informationen.....	V - 1
Anhang 2:	Öffentlich zugängliche Datensätze auf der Plattform des LAiV.....	V - 3
Anhang 3:	Beim LAiV abgefragte Datensätze der Umweltstatistik aus der Rubrik „Wasserversorgung und Abwasserentsorgung“.....	V - 4
Anhang 4:	Herleitung der Einkommensentwicklung anhand des Reallohnindex.....	V - 5
Anhang 5:	Chi <sup>2</sup> -Anpassungstest.....	V - 6
Anhang 6:	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest.....	V - 6
Anhang 7:	Häufigkeitsverteilungen und Dichtefunktionen der Rahmenparameter bei Annahme einer Normalverteilung innerhalb der möglichen Ausprägungen.....	V - 7
Anhang 8:	Indirekteinleitender industrieller Schmutzwasserstrom der KA 12 des exemplarischen Aufgabenträgers.....	V - 8
Anhang 9:	Kenndaten der KA des betrachteten Aufgabenträgers.....	V - 9
Anhang 10:	Validierung der Schlammengen.....	V - 9
Anhang 11:	Vergleich der sich ergebenden elektrischen Energieverbräuche bei Verwendung der einwohnerspezifischen Verbräuche nach DWA (ohne Kalibrierung).....	V - 10
Anhang 12:	Simulierte Kanalnetzkilometer in den Zustandsklassen im Validierungszeitraum.....	V - 10
Anhang 13:	Simulierte Instandhaltungskosten und Restbuchwerte des SWEN im Validierungszeitraum.....	V - 11
Anhang 14:	Validierungsergebnisse technischer Parameter und resultierende Kosten der Kläranlagen.....	V - 11
Anhang 15:	Anhang: Simulierte Kostenentwicklung im Validierungszeitraum.....	V - 12
Anhang 16:	Kanalzustandsklassenentwicklung bei unterschiedlichen Kanalsanierungsquoten.....	V - 13
Anhang 17:	Entwicklung des Kanalnetzzustandes (arithmetisches Mittel) bei unterschiedlichen Kanalsanierungsquoten und der damit verbundenen relativen Kanalreparaturkosten.....	V - 14
Anhang 18:	Zentralisierungskonzepte in Abhängigkeit vom Kostenanteil der Herstellungskosten und deren Einsparpotential.....	V - 15
Anhang 19:	Einsparpotentiale von Fusionen bei Aufgabenträgern der Abwasserwirtschaft auf der Grundlage von Kostenbetrachtungen aus Gutachten.....	V - 16
Anhang 20:	Öffentlich Zugängliche Daten der angrenzenden Aufgabenträger aus der Umweltstatistik des LAiV aus der Rubrik „Wasserversorgung und Abwasserentsorgung“.....	V - 16
Anhang 21:	Kenndaten der KA des für die Fusion ausgewählten AT IV.....	V - 16
Anhang 22:	Resultierende KA-Überleitungen aus der Kombination der Anpassungsmaßnahmen Zusammenschluss (mit AT IV) und Zentralisierung.....	V - 17
Anhang 23:	Absolute und relative Haushaltsbelastungen durch die SWW für SH und ZPH in 2050.....	V - 17

**Anhang 1:** Inhalte des Abfrageformulars für die zusätzlichen beim Aufgabenträger abgefragten Informationen

**Finanzen**

Fördermittelsumme für Kanalnetz	(€)
Fördermittelsumme für Behandlungsanlagen	(€)
Auflösung von Fördermitteln	(€ a <sup>-1</sup> )
Beitragshöhe	(€ m <sup>-2</sup> )
Beitragssumme	(€)
Auflösung der Beiträge	(€ a <sup>-1</sup> )
Grundgebühr	ja/nein
Tagesneuwert	ja/nein
Eigenkapitalzinssatz	(%)

**Organisationsstruktur**

Personal in der Verwaltung	(-)
Personal für Betrieb der Behandlungsanlagen	(-)
Personal für Betrieb des Kanalnetzes	(-)
Personalkosten Verwaltung	(€ a <sup>-1</sup> )
Personalkosten Anlagen	(€ a <sup>-1</sup> )
Personalkosten Kanalnetz	(€ a <sup>-1</sup> )
Kosten kaufm. Betriebsführung	(€ a <sup>-1</sup> )
Kosten techn. Betriebsführung Anlagen	(€ a <sup>-1</sup> )
Kosten techn. Betriebsführung Netz	(€ a <sup>-1</sup> )

**Abwasserbehandlungsanlagen**

Anschaffungs-/Herstellungskosten (gesamt)	(€)
Energieverbrauch (gesamt)	(kWh a <sup>-1</sup> )
Energiekosten (gesamt)	(€ a <sup>-1</sup> )
Fällmittellkosten gesamt	(€ a <sup>-1</sup> )
Eisen -Fällmittelmenge	(kg Fe a <sup>-1</sup> )
Aluminium -Fällmittelmenge	(kg Al a <sup>-1</sup> )
Schlammanfall	(kg TS a <sup>-1</sup> )
Art der Schlamm Entsorgung	Thermisch/Landwirtschaft
Kosten für Schlamm Entsorgung	(€ a <sup>-1</sup> )
Elektrische Energieerzeugung durch Faulgas	(kWh a <sup>-1</sup> )
Co-Substrat Menge	(kg TS <sub>org</sub> a <sup>-1</sup> )
Netzeinspeisung	(kWh a <sup>-1</sup> )
Ertrag durch Netzeinspeisung	(€ a <sup>-1</sup> )

### Schmutzwasserentwässerungssystem

Anschaffungs-/Herstellungskosten gesamt	(€)
Leitungslänge Zustandsklasse 4	(km)
Leitungslänge Zustandsklasse 3	(km)
Leitungslänge Zustandsklasse 2	(km)
Leitungslänge Zustandsklasse 1	(km)
Leitungslänge Zustandsklasse 0	(km)
Neuerschließungsquote	(%)
spez. Aufwand für Neuerschließung Kanal	(€ m <sup>-1</sup> )
Sanierungsquote im Prognosezeitraum	(%)
spez. Aufwand für Sanierung Kanal	(€ m <sup>-1</sup> )
Kanalreparaturkosten	(€ a <sup>-1</sup> )
spezifische Kanalreparaturkosten	(€ m <sup>-1</sup> )
Kanalnetzreinigungsquote	(%)
Kanalnetzreinigungskosten	(€ a <sup>-1</sup> )
spez. Kanalreinigungskosten	(€ m <sup>-1</sup> )

## Anhang 2: Öffentlich zugängliche Datensätze auf der Plattform des LAiV

Sachgebiet	Verf. Zeitraum	Erhebungs-ebene	Enthaltene Daten	Erhebung
Bevölkerung – Mikrozensus	ab 2000	Landkreis	Familienstand, Haushaltgröße, Erwerbsleben, Nettoeinkommen	Mikrozensus
Bevölkerungsstand	ab 1990	Gemeinde	Altersgruppen, Anzahl Einwohner	Zensus Fortschreibung
Flächennutzung	ab 2004	Gemeinde	Gebietsfläche, Verkehrsfläche, Siedlungsfläche, Gebäudefläche	Liegenschaftskataster basierende sekundärstatistische Erhebung
Gebäude und Wohnungen	ab 2003	Gemeinde	Anzahl Wohngebäude, Wohnfläche, Wohnungsgröße	Zensus Fortschreibung
Lohn und Einkommen	2002-2006	Gemeinde	Einkommensteuerpflichtige Einkünfte, Einkommenssteuer	Lohn- und Einkommensteuerstatistik

**Anhang 3:** Beim LAiV abgefragte Datensätze der Umweltstatistik aus der Rubrik „Wasserversorgung und Abwasserentsorgung“

Datensatzbezeichnung	Erhebungs- ebene	verf. Zeitraum	Tab. Nr.	Erhebungs- grundlage	Enthaltene Informationen
<u>Erhebung der öffentlichen Abwasserentsorgung</u>					
Art, Länge und Baujahr des Kanalnetzes			7SL.1		Kanalnetzbetreiber, Art, Länge
Gemeinden mit Anschluss an industrielle und ausländische Abwasserbehandlungsanlagen	Gemeinde	ab 2004	7SL.5	§ 7 Abs. 2 UStatG	Kanalnetzbetreiber, angeschlossene EW, Schmutzwassermenge
Direkteinleitung von Schmutzwasser in das Grundwasser und Oberflächengewässer			7SL.6		Kanalnetzbetreiber, Angeschlossene EW, Schmutzwassermenge
<u>Erhebung der öffentlichen Abwasserbehandlung</u>					
An Abwasserbehandlungsanlagen angeschlossene Einwohner			7KL.9	§ 7 Abs. 2 UStatG	angeschlossene EW, EGW, häusl. u. betriebl. Schmutzwassermenge
Abwasserbehandlungsanlagen	Gemeinde	ab 2004	7KR.10		Kanalnetzlänge, Anzahl KA, Art der Behandlungsstufen, Abwassermenge
<u>Erhebung über die Wassereigenversorgung und -entsorgung privater Haushalte</u>					
Gemeinden mit öffentlicher und privater Wasserversorgung			7P.1		EW, angeschl. EW an öffentl. WV bzw. ohne öffentl. WV
Gemeinden mit öffentlicher und privater Abwasserentsorgung	Gemeinde	ab 2007	7P.2	§ 7 Abs. 3 UStatG	EW, angeschl. EW, Anzahl KKA und abflusslose Gruben
Anschlussgrade an die öffentliche Abwasserentsorgung			7PR.3		EW mit Anschluss an öffentl. Kanalisation, EW mit Anschluss an zentrale KA
<u>Erhebung der Wasser- und Abwasserentgelte</u>					
Wasser- und Abwasserentgelte für die öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung	Gemeinde	ab 2007	-	§ 11 Abs. 2 UStatG	Trinkwasserentgelte, Schmutzwasserentgelte



#### Anhang 4: Herleitung der Einkommensentwicklung anhand des Reallohnindex

Auf Grundlage der Langzeitreihen der Bruttogehaltsentwicklung in den alten Bundesländern und der Inflationsrate innerhalb des Zeitraumes wurde der Reallohn ermittelt. Zusätzlich wurde die unterschiedliche Reallohnentwicklung in M-V im Vergleich zum Durchschnitt in Deutschland als auch zu den alten und neuen Bundesländern abgebildet.

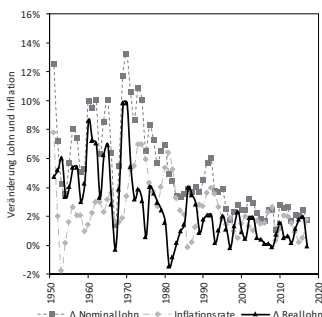
Verwendete Quellen:

StatA M-V (2016) Statistische Berichte: Primäreinkommen und verfügbares Einkommen der kreisfreien Städte und Landkreisen Mecklenburg-Vorpommerns 2000 bis 2014 - Ergebnisse nach Revision 2014. Statistischer Bericht P233 2014 00, Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.

StatA M-V (2016): Statistische Berichte: Bruttolöhne und -gehälter sowie Arbeitnehmerentgelt der Wirtschaftsbereiche in den kreisfreien Städten und Landkreisen Mecklenburg-Vorpommerns 2000-2014 - Ergebnisse nach Revision 2014. Statistischer Bericht P223 2014 00, Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.

StatBA (2017): Laufende Wirtschaftsrechnungen: Einkommen, Einnahmen und Ausgaben privater Haushalte 2015. Fachserie 15 Reihe 1, Statistisches Bundesamt (DESTATIS), Wiesbaden.

StatBA (2018): Verdienste und Arbeitskosten: Arbeitnehmerverdienste: Lange Reihen, 1. Vierteljahr 2018. Fachserie 16 Reihe 2.4, Statistisches Bundesamt (DESTATIS), Wiesbaden.

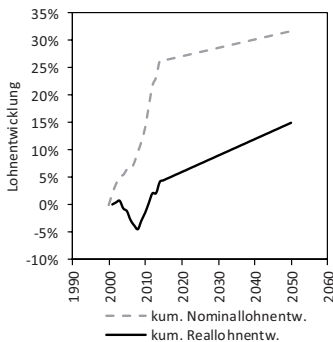


Langzeitreihen der Bruttogehaltsentwicklung

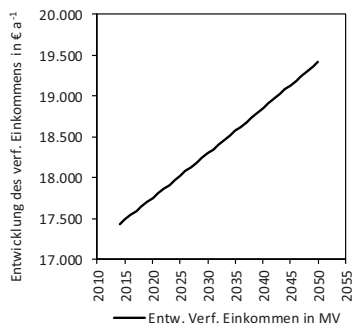


Vergleich der Reallohnentwicklung

Auf der Datengrundlage der Nominal- und Reallohnentwicklung in M-V erfolgte deren Extrapolation bis 2050.



Nominal- und Reallohnentwicklung in M-V



Entwicklung des verfügbaren Einkommens

## Anhang 5: Chi<sup>2</sup>-Anpassungstest

$$H_0: F_x(x) = F_0(x)$$

$$H_1: F_x(x) \neq F_0(x)$$

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

$$f_{(z)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

$$h_E = \Delta f_{(z_{i+1} - z_i)} \cdot \sum_{i=1}^n N$$

z	z-Werttransformation	(-)	f <sub>(z)</sub>	Standardnormal- verteilungsfunktion	(-)	h <sub>E</sub>	erwartete Häufigkeit	(-)
σ	Standardabweichung	(-)			(-)	N	Stichprobe der beob. Häufigkeiten	(-)
x	Klassenwert	(-)	e	Eulerzahl	(-)	Δf	Flächendifferenz	(-)
$\bar{x}$	Mittelwert	(-)				n	Anzahl Beobachtungen	(-)

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(h_i - h_E)^2}{h_E}$$

$$X^2 > X_{1-\alpha, df}^2$$

X <sup>2</sup>	Prüfgröße	(-)	X <sup>2</sup> <sub>1-α, df</sub>	Testgröße in Abhängigkeit von Freiheitsgrad (df) u. Signifikanzniveau(α)	(-)
h <sub>i</sub>	beobachtete Häufigkeit	(-)			

## Anhang 6: Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest

$$H_0: F_z(z) = F_0(z)$$

$$H_1: F_z(z) \neq F_0(z)$$

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

$$f_{(z)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

$$a_{(i)} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n}$$

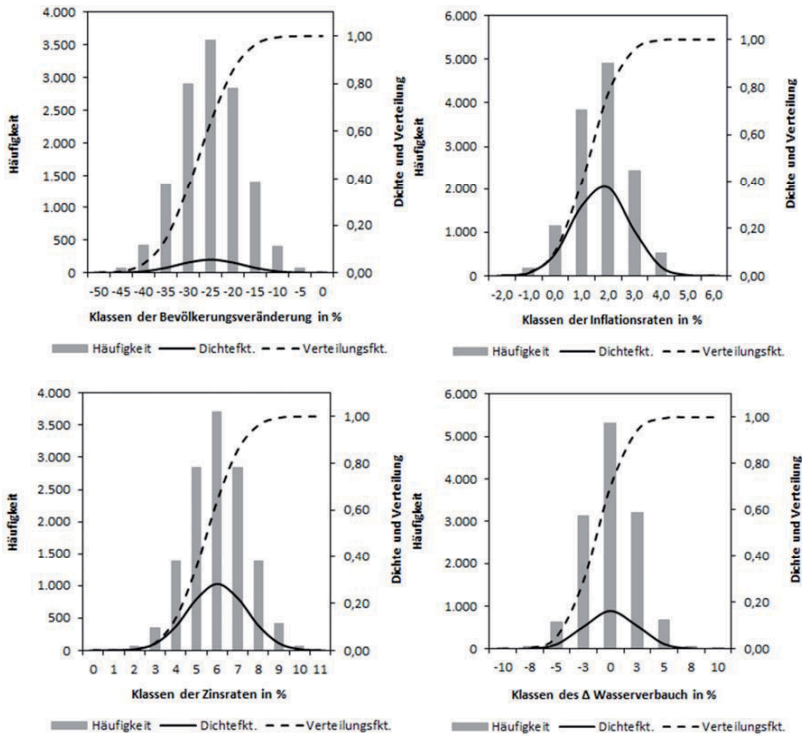
a	idealer Abstand	(-)
n	Anzahl Beobachtungen	(-)

$$d_{(i)} = |f_{(z_i)} - a_{(i-1)}| \quad p = \max(d_1, \dots, d_n)$$

$$p < p_\alpha$$

d	absolute Differenzen	(-)	p	Maximalwert von d als Prüfgröße	(-)	p <sub>α</sub>	Testgröße in Abhängigkeit von Signifikanzniveau (α)	(-)
---	----------------------	-----	---	------------------------------------	-----	----------------	--	-----

**Anhang 7:** Häufigkeitsverteilungen und Dichtefunktionen der Rahmenparameter bei Annahme einer Normalverteilung innerhalb der möglichen Ausprägungen



## Anhang 8: Indirekteinleitender industrieller Schmutzwasserstrom der KA 12 des exemplarischen Aufgabenträgers

Parametereinstellung: Abscheideleistung der Vorbehandlung des industriellen Schmutzwasserstromes

Anlagenkomponente	$\eta_{\text{CSB}}$ (-)	$\eta_{\text{TS, anorg}}$ (-)	$\eta_{\text{N}}$ (-)	$\eta_{\text{P}}$ (-)
Trommelsieb	0,3	0,55	0,16	0,12
Absetzbecken	0,4	0,50	0,1	0,1
UASB	0,9	0,65	0,1	0,1

### Berechnung UASB-Reaktoren

Die Berechnung erfolgte nach DWA (2016): Bemessung von Kläranlagen in warmen und kalten Klimazonen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef. ISBN: 978-3-88721-409-8.

Parameter	Einheit	Wert
$GV_{\text{TS}}$	(%)	63
$f_{\text{CSB}}$	(g CSB g oTS <sup>-1</sup> )	1,6
$\eta_{\text{CSB, hyd}}$	(-)	0,80

	Parameter	Fracht (kg d <sup>-1</sup> )	Gleichung
Zulauf	$B_{\text{d,CSB,ZR}}$	7.500	
	$B_{\text{d,CSB,part,ZR}}$	4.688	$B_{\text{d,CSB,part,ZR}} = B_{\text{d,CSB,ZR}} / f_{\text{CSB}}$
	$B_{\text{d,TS,ZR}}$	5.752	$B_{\text{d,TS,ZR}} = B_{\text{d,oTS,ZR}} + B_{\text{d,anorgTS,ZR}}$
	$B_{\text{d,oTS,ZR}}$	4.688	
	$B_{\text{d,anorgTS,ZR}}$	1.050	
Reaktor	$B_{\text{d,CSB,part,hyd}}$	3.750	$B_{\text{d,CSB,part,hyd}} = \eta_{\text{CSB, hyd}} \cdot B_{\text{d,CSB,part,ZR}}$
	$B_{\text{d,oTS,hyd}}$	2.344	$B_{\text{d,oTS,hyd}} = B_{\text{d,CSB,part,hyd}} / f_{\text{CSB}}$
	$B_{\text{d,oTS,Rest}}$	2.344	$B_{\text{d,oTS,Rest}} = B_{\text{d,oTS,ZR}} - B_{\text{d,oTS,hyd}}$
	$B_{\text{d,oTS,akku}}$	1.961	$B_{\text{d,oTS,akku}} = B_{\text{d,oTS,Rest}} - B_{\text{d,oTS,AR}}$
	$B_{\text{d,anorgTS,akku}}$	933	$B_{\text{d,anorgTS,akku}} = B_{\text{d,anorgTS,ZR}} - B_{\text{d,anorgTS,AR}}$
	$B_{\text{d,TS,akku}}$	2.893	$B_{\text{d,TS,akku}} = B_{\text{d,anorgTS,akku}} + B_{\text{d,oTS,akku}}$
Ablauf	$B_{\text{d,CSB,AR}}$	680	
	$B_{\text{d,TS,AR}}$	500	$B_{\text{d,TS,AR}} = X_{\text{oTS,AR}} \cdot 100 / GV_{\text{TS}} \cdot Q_{\text{d}} \cdot 10^{-3}$
	$B_{\text{d,oTS,AR}}$	383	$B_{\text{d,oTS,AR}} = X_{\text{CSB,AR}} \cdot Q_{\text{d}}$
	$B_{\text{d,anorgTS,AR}}$	117	$B_{\text{d,anorgTS,AR}} = B_{\text{d,TS,AR}} - B_{\text{d,oTS,AR}}$

## Anhang 9: Kenndaten der KA des betrachteten Aufgabenträgers

Objekt	VT	GK (-)	Ausbaugröße (EW)	Baujahr
KA 1	TKA <sub>unbe.</sub>	1	450	1988
KA 2	TKA <sub>unbe.</sub>	1	105	1994
KA 3	TKA <sub>unbe.</sub>	1	400	2006
KA 4	TKA <sub>unbe.</sub>	2	1.550	1990
KA 5	BB <sub>anorob</sub>	1	350	1967
KA 6	RTK	1	280	1994
KA 7	BB <sub>anorob</sub>	1	180	1994
KA 8	TKA <sub>unbe.</sub>	1	200	1992
KA 9	BB <sub>anorob</sub>	2	1.100	1996
KA 10	TKA <sub>unbe.</sub>	1	500	1994
KA 11	TKA <sub>unbe.</sub>	1	1.000	1997
KA 12	BB <sub>anorob</sub> + FB	5	200.000	2002
KA 13	BB <sub>anorob</sub>	1	125	1993
KA 14	TKA <sub>unbe.</sub>	1	160	1993

## Anhang 10: Validierung der Schlammengen

Von den Standardwerten abweichende Parameteranpassungen der KA-Verfahrenstechniken

Parameter	Einheit	BB GK 1-3	BB GK 4-5	RTK GK 1-3	TKA < 500 EW	TKA > 500 EW
$f_{TS}$	(g TS/g CSB)	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
$\eta_{VK,TS,part}$	(%)	65	50	80	90	60
$\eta_{VK,CSB}$	(%)	40	40	40	45	45
$\eta_{VK,P}$	(%)	10	10	10	10	10
$\eta_{anorgTS}$	(%)	30	25	30	30	30

Ergebnisvergleich zwischen Real- und Simulationswerten

Objekt	$V_{S,Real}$ (m <sup>3</sup> )	$TS_{Real}$ (%)	$TS_{Sim}$ (%)	$V_{S,Sim}$ (m <sup>3</sup> )	$\Delta V_S$ (m <sup>3</sup> )	$\Delta V_S$ (%)
KA 1	53	8,4	8,4	55	2	4
KA 2	9	7,5	7,5	9	0	0
KA 3	325	1,4	1,4	380	55	17
KA 4	26	k.A.	35,0	32	6	23
KA 5	344	k.A.	1,5	203	-141	-41
KA 6	426	2,9	2,9	76	-350	-82
KA 7	201	1,9	1,9	113	-88	-44
KA 8	44	3,2	3,2	64	20	46
KA 9	244	k.A.	2,0	314	70	29
KA 10	94	4,0	4,0	109	15	16
KA 11	15	k.A.	35,0	19	4	27
KA 12	40.834	k.A.	3,6	40.661	-173	0
KA 13	140	k.A.	1,5	93	-47	-34
KA 14	16	k.A.	5,5	16	0	0

**Anhang 11:** Vergleich der sich ergebenden elektrischen Energieverbräuche bei Verwendung der einwohnerspezifischen Verbräuche nach DWA (ohne Kalibrierung)

Objekt	NEW.KA.Dim (EW)	NEW.KA.Nom (EW)	E <sub>el</sub> KA.Verbr.EW (kWh EW <sup>-1</sup> )	E <sub>el</sub> KA.Verbr.Dim (kWh)	E <sub>el</sub> KA.Nom (kWh)	ΔE <sub>el</sub> KA.Verbr.Dim (kWh)	ΔE <sub>el</sub> KA.Verbr.Nom (%)
KA 5	350	292	92,8	32.480	27.098	23.364	7.083
KA 6	280	134	44,4	14.896	7.129	+684	+4,8
KA 7	180	223	63,7	11.466	14.205	-4.498	-28,2
KA 9	1.100	229	53,2	48.840	10.168	26.169	115,4
KA 12	200.000	187.181	31,9	6.380.000	5.971.074	4.288.028	205,0
KA 13	125	109	63,7	7.963	6.943	-3.147	-28,3
					Σ	-4.330.601	200,0
						-3.871.572	178,8

**Anhang 12:** Simulierte Kanalnetzkilometer in den Zustandsklassen im Validierungszeitraum

Jahr	ZK4 (km)	ZK3 (km)	ZK2 (km)	ZK1 (km)	ZK0 (km)	Ges (km)
2001	109,7	22,3	15,9	6,4	4,8	159
2002	79,2	59,1	12,1	11,6	6,3	168
2003	70,4	66,0	20,7	8,4	12,0	177
2004	70,6	65,8	24,5	11,8	14,1	187
2005	75,5	63,9	25,8	12,9	17,7	196
2006	83,6	61,78	26,3	12,9	20,6	205
2007	93,8	59,7	26,5	12,7	21,7	214
2008	105,9	57,6	26,6	12,6	20,9	224
2009	119,4	55,6	26,7	12,6	18,6	233
2010	134,2	53,4	26,9	12,8	14,9	242
2011	144,0	54,3	26,2	12,7	14,2	251
2012	156,3	53,9	26,0	12,6	11,9	261
2013	170,5	52,7	26,0	12,5	8,1	270
2014	185,9	51,1	26,0	12,6	3,4	279

**Anhang 13:** Simulierte Instandhaltungskosten und Restbuchwerte des SWEN im Validierungszeitraum

Jahr (-)	K <sub>KanKein</sub> (t€)	K <sub>KanRep</sub> (t€)	K <sub>KanSan</sub> (t€)	K <sub>KanNeu</sub> (t€)	RBW <sub>Kan</sub> (t€)
2001	7,5	8,0	645,9	1.233	19.450
2002	7,8	9,9	659,5	1.259	20.448
2003	8,0	13,6	673,1	1.285	21.444
2004	8,2	17,0	686,6	1.311	22.436
2005	8,4	20,3	700,2	1.336	23.425
2006	8,6	22,6	713,8	1.362	24.409
2007	8,8	23,7	727,3	1.388	25.389
2008	8,9	23,5	740,9	1.414	26.363
2009	9,0	22,3	754,5	1.440	27.331
2010	9,1	20,1	768,0	1.466	28.292
2011	9,2	19,8	781,6	1.492	29.246
2012	9,3	18,3	795,1	1.518	30.192
2013	9,3	15,8	808,7	1.544	31.129
2014	9,3	12,6	822,3	1.569	32.058

**Anhang 14:** Validierungsergebnisse technischer Parameter und resultierende Kosten der Kläranlagen

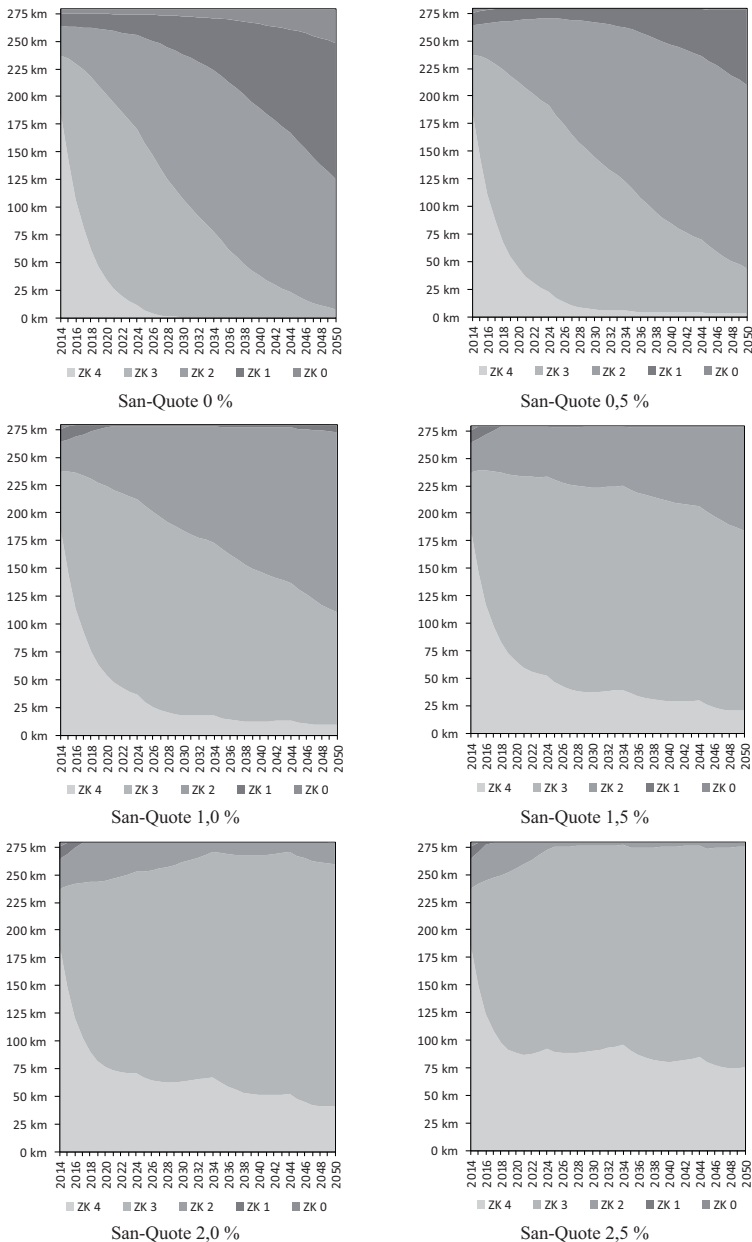
Jahr (-)	E <sub>el,In</sub> (MWh a <sup>-1</sup> )	E <sub>el,Gas</sub> (MWh a <sup>-1</sup> )	E <sub>el,Rest</sub> (MWh a <sup>-1</sup> )	E <sub>el,Out</sub> (MWh a <sup>-1</sup> )	K <sub>KLA-Energie-AZV</sub> (t€)	E <sub>KLA-Energie-Out-AZV</sub> (t€)	V <sub>S,TS,AZV</sub> (kg TS a <sup>-1</sup> )	K <sub>S,TS,AZV</sub> (t€)	MP <sub>Fall-AZV</sub> (kg Fe a <sup>-1</sup> )	K <sub>P,Fall-AZV</sub> (t€)
2001	1.967	1.719	1.967	1.719	147,9	103,9	56.276	127,0	4.937	20,7
2002	2.307	4.270	94	2.058	7,9	261,7	37.695	92,2	17.313	70,5
2003	2.295	4.251	93	2.050	8,5	257,7	37.322	98,3	17.052	67,5
2004	2.283	4.231	92	2.041	9,1	253,7	36.949	104,4	16.790	64,6
2005	2.271	4.212	91	2.032	9,7	249,7	36.576	110,2	16.529	61,7
2006	2.259	4.192	89	2.023	10,2	245,8	36.203	116,0	16.267	58,9
2007	2.247	4.173	88	2.014	10,8	241,8	35.830	121,6	16.006	56,2
2008	2.236	4.153	87	2.004	11,3	237,9	35.457	127,0	15.744	53,5
2009	2.224	4.134	86	1.995	11,9	234,0	35.084	132,3	15.483	50,8
2010	2.213	4.114	85	1.986	12,4	230,1	34.711	137,5	15.221	48,2
2011	2.201	4.095	83	1.977	12,8	226,2	34.338	142,5	14.960	45,7
2012	2.190	4.075	82	1.967	13,3	222,4	33.965	147,4	14.698	43,3
2013	2.178	4.056	81	1.958	13,8	218,5	33.592	152,2	14.437	40,9
2014	2.167	4.036	80	1.949	14,2	214,7	33.218	156,8	14.175	38,5

**Anhang 15:** Anhang: Simulierte Kostenentwicklung im Validierungszeitraum

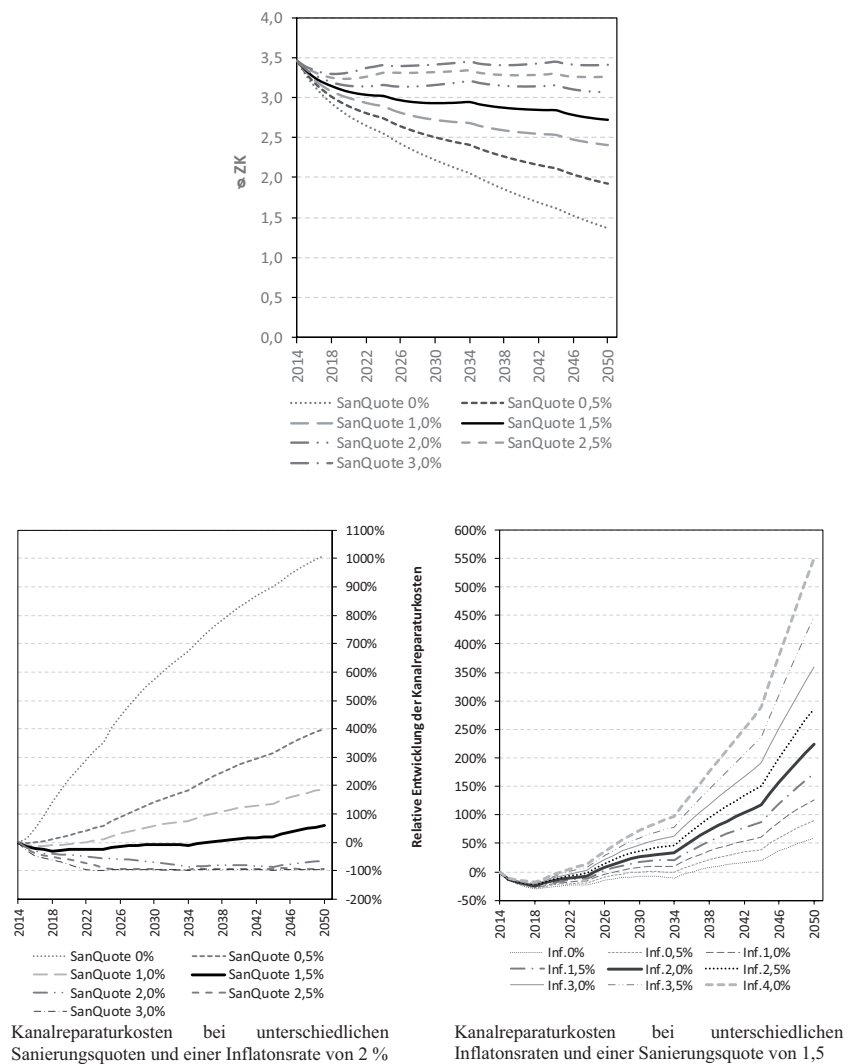
Jahr	$G_M$ (€ m <sup>-3</sup> )	$G_G$ (€ a <sup>-1</sup> )	$K_{p,Ges}$ (T€)	$K_B$ (T€)	$K_L$ (T€)	$K_Z$ (T€)	$K_{sAw}$ (T€)	$K_A$ (T€)
2001	2,60	64,82	924	392	1.479	695	492	1.374
2002	2,54	64,82	945	310	1.427	684	487	1.403
2003	2,56	64,82	966	316	1.417	670	483	1.433
2004	2,58	64,82	987	323	1.407	659	479	1.463
2005	2,60	64,82	1.008	330	1.397	651	474	1.495
2006	2,62	64,82	1.029	338	1.387	646	470	1.527
2007	2,65	64,82	1.050	347	1.376	643	466	1.559
2008	2,69	64,82	1.072	356	1.366	644	462	1.593
2009	2,72	64,82	1.093	366	1.356	648	457	1.628
2010	2,76	64,82	1.114	377	1.345	655	453	1.663
2011	2,80	64,82	1.135	389	1.335	665	449	1.699
2012	2,85	64,82	1.156	401	1.325	678	444	1.736
2013	2,89	64,82	1.177	415	1.314	694	440	1.774
2014	2,95	64,82	1.198	430	1.304	713	436	1.812



Anhang 16: Kanalzustandsklassenentwicklung bei unterschiedlichen Kanalsanierungsquoten



**Anhang 17:** Entwicklung des Kanalnetzzustandes (arithmetisches Mittel) bei unterschiedlichen Kanalsanierungsquoten und der damit verbundenen relativen Kanalreparaturkosten



**Anhang 18:** Zentralisierungskonzepte in Abhängigkeit vom Kostenanteil der Herstellungskosten und deren Einsparpotential

Szenario I

K <sub>At</sub> (%)	Anzahl ÜL	Einsparung Ges (T€)	KA 1	KA 2	KA 3	KA 4	KA 5	KA 6	KA 7	KA 8	KA 9	KA 10	KA 11	KA 12	KA 13	KA 14
100	1	3,6	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
90	1	5,4	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
80	1	7,2	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
70	1	8,9	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
60	1	10,7	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
50	2	13,1	0	0	0	0	10	0	11	0	0	0	0	0	0	0
40	2	18,5	0	0	0	0	10	0	11	0	0	0	0	0	0	0
30	3	21,4	0	0	0	0	12	11	11	0	0	0	0	0	0	0
20	6	39,1	0	0	0	12	12	10	11	0	11	0	9	0	0	0

Szenario II

K <sub>At</sub> (%)	Anzahl ÜL	Einsparung Ges (T€)	KA 1	KA 2	KA 3	KA 4	KA 5	KA 6	KA 7	KA 8	KA 9	KA 10	KA 11	KA 12	KA 13	KA 14
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	1	1.238	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
70	1	4.687	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
60	1	8.135	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
50	1	11.58	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
40	1	15.031	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
30	2	19.982	0	0	0	0	10	0	11	0	0	0	0	0	0	0
20	5	35.377	0	0	0	12	12	11	11	0	11	0	0	0	0	0

Szenario III

K <sub>At</sub> (%)	Anzahl ÜL	Einsparung Ges (T€)	KA 1	KA 2	KA 3	KA 4	KA 5	KA 6	KA 7	KA 8	KA 9	KA 10	KA 11	KA 12	KA 13	KA 14
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	1	0,4	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
60	1	5,5	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
50	1	10,7	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
40	1	15,8	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
30	1	20,9	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0
20	4	98,9	0	0	0	0	11	11	11	0	0	11	0	0	0	0

## Anhang 19: Einsparpotentiale von Fusionen bei Aufgabenträgern der Abwasserwirtschaft auf der Grundlage von Kostenbetrachtungen aus Gutachten

Unter Berücksichtigung der Anonymität wurden vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen - Anhalt Gutachten zu Kostenbetrachtungen von Aufgabenträgerzusammenschlüssen im Bereich der Abwasserwirtschaft zur Verfügung gestellt. Daraus zu entnehmen waren die Personalkosteneinsparungen von sieben Zusammenschlüssen.

	Ein- heit	Fu I		Fu II		Fu III		Fu IV		Fu V		Fu VI		Fu VII	
		1a	10a	1a	10a	1a	10a	1a	10a	1a	10a	1a	10a	1a	10a
K <sub>P,Ges</sub>	(%)	5,1	16,4	0,8	31,6	6,5	31,9	0	21,0	0	25,6	0	42,0	0	22,2

Eine ausführliche Kostenbetrachtung fand zwischen drei Aufgabenträgern (zwei Zusammenschlüssen) statt. Daraus ließen sich folgende Einsparpotentiale in den aufgeführten Kostenarten ableiten. Basierend auf diesen Gutachten wurden die Einsparraten für die jeweiligen Kostenarten im Modul *Zusammenschluss* festgelegt.

Kostenart	Fu A (%)	Fu B (%)	Einsparpotential im Modell (%)
K <sub>B</sub>	12,6	9,4	10
K <sub>L</sub>	2,1	1,1	5
K <sub>sAw</sub>	11,2	11,0	10

## Anhang 20: Öffentlich Zugängliche Daten der angrenzenden Aufgabenträger aus der Umweltstatistik des LAiV aus der Rubrik „Wasserversorgung und Abwasserentsorgung“

AT	E (-)	EWG (-)	EW (-)	KA (-)	SW-Menge (m³ a⁻¹)	Einleiter (E)	Kanal (km)	G <sub>M</sub> (€ m³)	G <sub>G</sub> (€ a⁻¹)
AT I	26.449	8.343	34.792	22	966.000	21.224	325,9	2,45	57,22
AT II	4.361	54.183	58.544	4	909.000	2.959	69,5	3,04	85,86
AT III	16.868	25.440	42.308	23	914.000	12.671	118,6	3,10	93,26
AT IV	32.530	58.909	91.439	22	1.878.000	20.866	336,7	2,66	44,21

## Anhang 21: Kenndaten der KA des für die Fusion ausgewählten AT IV

Objekt	VT	GK (-)	Ausbaugröße (EW)	Baujahr
KA 15	TKA <sub>be</sub> .	1	500	2000
KA 16	BB <sub>anero</sub>	1	720	1999
KA 17	TKA <sub>be</sub> .	1	315	2001
KA 18	TKA <sub>unbe</sub> .	1	150	1996
KA 19	BB <sub>anero</sub>	1	300	2002
KA 20	TKA <sub>unbe</sub> .	1	300	1992
KA 21	TKA <sub>unbe</sub> .	1	220	2001
KA 22	RTK	1	400	1999
KA 23	RTK	2	2.100	2002
KA 24	TKA <sub>unbe</sub> .	2	1.095	2004
KA 25	TKA <sub>unbe</sub> .	1	100	2004
KA 26	TKA <sub>unbe</sub> .	1	100	2000
KA 27	TKA <sub>unbe</sub> .	1	400	2006
KA 28	BB <sub>anero</sub>	2	3.000	2006
KA 29	BB <sub>anero</sub>	2	1.400	2005
KA 30	TKA <sub>unbe</sub> .	1	175	2005
KA 31	TKA <sub>unbe</sub> .	1	270	2002
KA 32	TKA <sub>unbe</sub> .	1	220	2004
KA 33	TKA <sub>be</sub> .	1	440	2004
KA 34	TKA <sub>unbe</sub> .	1	620	2005
KA 35	TKA <sub>unbe</sub> .	1	100	2005
KA 36	BB <sub>anero</sub>	4	93.000	2008

**Anhang 22:** Resultierende KA-Überleitungen aus der Kombination der Anpassungsmaßnahmen Zusammenschluss (mit AT IV) und Zentralisierung

Szenario I

K <sub>At</sub> (%)	Anzahl ÜL	Einsparung Ges (T€)	KA 4	KA 7	KA 19	KA 22	KA 23	KA 29
100	2	10.322	0	11	20	0	0	0
60	6	61.216	12	11	20	21	28	34

Szenario II

K <sub>At</sub> (%)	Anzahl ÜL	Einsparung Ges (T€)	KA 4	KA 7	KA 19	KA 22	KA 23	KA 29
100	2	6.734	0	0	20	0	0	0
60	6	48.050	0	11	20	0	28	0

Szenario III

K <sub>At</sub> (%)	Anzahl ÜL	Einsparung Ges (T€)	KA 4	KA 7	KA 19	KA 22	KA 23	KA 29
100	2	0	0	0	0	0	0	0
60	6	39.717	0	11	20	0	28	0

**Anhang 23:** Absolute und relative Haushaltsbelastungen durch die SWW für SH und ZPH in 2050

Anpassungs- maßnahme	Einheit	ZPH			SH		
		Sz I	Sz II	Sz III	Sz I	Sz II	Sz III
Prognose	(€ a <sup>-1</sup> )	343	576	895	373	605	924
	(%)	1,8	3,0	4,6	1,9	3,1	4,8
Zen	(€ a <sup>-1</sup> )	343	575	895	372	605	924
	(%)	1,8	3,0	4,6	1,9	3,1	4,8
Ko	(€ a <sup>-1</sup> )	328	538	818	357	567	848
	(%)	1,7	2,8	4,2	1,8	2,9	4,4
Ko-SVZ	(€ a <sup>-1</sup> )	321	529	809	330	538	818
	(%)	1,7	2,7	4,2	1,7	2,8	4,2
Fu	(€ a <sup>-1</sup> )	339	449	599	358	489	638
	(%)	1,7	2,3	3,1	1,8	2,5	3,3
Fu-SVZ	(€ a <sup>-1</sup> )	334	442	591	353	461	610
	(%)	1,7	2,3	3,0	1,8	2,4	3,1
Fu-Zen	(€ a <sup>-1</sup> )	339	446	588	358	465	607
	(%)	1,7	2,3	3,0	1,8	2,4	3,1

# Wissenschaftlicher Lebenslauf

## Persönliche Informationen

Name	<b>MATHIAS GIEßLER</b>
Staatsangehörigkeit	Deutsch
Geburtsdatum	28. September 1983, Neubrandenburg
Familienstand	ledig

## Aktuelle Dienstadresse

Emschergenossenschaft/Lippeverband  
Vorstandsbereich Strategie und kaufmännische Services  
Stabsstelle Koordination von Unternehmensthemen  
  
Kronprinzenstraße 24  
45128 Essen  
  
Tel.: 0201 104-3406

## Wissenschaftliche Tätigkeiten

Mrz. 2016 – Feb. 2018	<b>Projektmanager</b> <i>Emschergenossenschaft/Lippeverband</i> <i>Geschäftsbereich Öffentlichkeitsarbeit und Fördermanagement</i> <i>Entwicklung und Management von Förderprojekten</i> <ul style="list-style-type: none"><li>• Akquise und Management von Förderprojekten</li><li>• Entwicklung und Aufbau einer Förderprojektdatenbank als Unternehmensweite Portallösung für Projekt - Controlling und Wissensmanagement</li></ul>
Sep. 2011 – Feb. 2016	<b>Wissenschaftlicher Mitarbeiter</b> <i>Universität Rostock</i> <i>Professur für Wasserwirtschaft</i> <ul style="list-style-type: none"><li>• Koordination und Bearbeitung von Forschungsprojekten im Themenbereich Wasserwirtschaft</li><li>• Nationale und internationale Ergebnispräsentationen</li><li>• Durchführung von Seminaren</li><li>• Betreuung von studentischen Abschlussarbeiten</li></ul> <b>Wissenschaftliche Hilfskraft</b> <i>Universität Rostock</i> <i>Professur für Hydromechanik und Siedlungswasserwirtschaft</i>
Apr. 2010 – Jan. 2011	Auswertung von Abwasserdaten und Durchführung von Versuchen
Jun. 2009 – Nov. 2009	Durchführung von Messungen, Betreuung und Wartung von Probenehmern

**Wissenschaftliche Hilfskraft***Universität Rostock**Professur für Bodenkunde*

Dez. 2008	Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsprojektes und Einrichtung des Versuchsstandorts Dummerstorf
Okt. 2007 – Dez.2007	Entwicklung geeigneter Methoden zur differenzierten Untersuchung der Färbung auf Grundwasserproben

**Projekte**

Aug. 2018 - Dez. 2020	Antragstellung und Koordination des Drittmittelprojektes (MULNV NRW): Spurenstoffe in der Lippe - Situationsanalyse der Gesamtemissionen und Szenarienbetrachtung zur Reduktion der Einträge aus Kläranlagen im Lippeverbandsgebiet.
Mrz. 2016 – Feb. 2019	Beteiligung beim Drittmittelprojekt (MULNV NRW): Den Spurenstoffen auf der Spur in Dülmen (DSADS) - Teilprojekt III: Forschungsbetrieb zum Betriebsverhalten und Ressourcenverbrauch der Aktivkohlestufe der Kläranlage Dülmen unter besonderer Berücksichtigung der erzielbaren Effekte für das vorgelagerte Gewässer.
Mrz. 2017 – Aug. 20017	Mitwirkung bei der Antragstellung und Konzeptentwurf für das BMBF-Projekt (02WPL1445A-F): Reduktion des Eintrages von Plastik über das Abwasser in die aquatische Umwelt (REPLAWA)
Jan. 2016 – Mrz.2016	Mitarbeit am Drittmittelprojekt: Strategien zur Überwachung/Vermeidung von Sedimentation in Abwasserdruckleitungen.
Apr. 2015 – Sep. 2015	Mitarbeit an der Erstellung einer Studie (Drittmittelprojekt MLUV MV): Phosphor-Elimination in Kleinkläranlagen bis 10.000 Einwohnerwerte in Mecklenburg-Vorpommern.
Mrz. 2013 – Mrz. 2015	Mitarbeit am AiF-Projekt (KF 2719006 GM2): Entwicklung eines ozonbasierten Verfahrens zur Elimination von schwer abbaubaren Stoffen und Pharmarückständen aus Abwässern mittels negativer Koronaentladungen und nachgeschalteter Aktivkohlefiltration (GAK): Durchführung von Abbauversuchen mit einer Laboranlage zur Elimination von Pharmarückständen aus Abwässern.
Jan. 2013 – Mrz. 2013	Bearbeitung des Drittmittelprojektes: Untersuchung von Temperaturveränderungen durch einen Wärmetauscher und deren Auswirkungen auf die Betriebsweise der KA Grevesmühlen.
Sep. 2011 – Dez. 2012	Bearbeitung und Koordination des BMBF-Projektes (02WM1048): Entwicklung und Implementierung eines wissenschaftlich fundierten Managementsystems zur Reduktion von diffusen Stoffeinträgen in das Miyun-Trinkwasserreservoir bei Peking/China. Teilprojekt: Ingenieurtechnik.

## Schulische und akademische Ausbildung

Sept. 2013 – heute	<b>Promotion</b> <i>Universität Rostock</i> <i>Professur für Wasserwirtschaft</i>  Angestrebter akademischer Grad: Dr. - Ing. Promotionsthesis: „Ein prozessbasiertes Modell zur wirtschaftlich-technischen Abbildung von Abwasserunternehmen - Beispielhafte Anwendung für eine ländliche Region mit Bevölkerungsrückgang“
Nov. 2008 – Mrz. 2011	<b>Master of Science Landeskultur und Umweltschutz</b> <i>Universität Rostock</i> <i>Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät</i>  Spezialisierungen: <ul style="list-style-type: none"><li>• Hydromechanik und Siedlungswasserwirtschaft</li><li>• Hydrologie und Landschaftswasserhaushalt</li></ul> Masterthesis: „Implementierung von Modellansätzen zu Sedimentations- und Remobilisierungsvorgängen in das Simulationsprogramm SIMBA“ (1,0)  Gesamtnote: 1,6
Okt. 2005 – Nov. 2008	<b>Bachelor of Science Landeskultur und Umweltschutz</b> <i>Universität Rostock</i> <i>Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät</i>  Bachelorthesis: „Methodische Aspekte bei der Farbuntersuchung von Grundwasserproben eines degradierten Niedermoores in Nordostdeutschland“ (2,0)  Gesamtnote: 2,6
Sep. 2000 – Jul. 2003	<b>Allgemeine Hochschulreife</b> Fachgymnasium für Elektrotechnik, Neubrandenburg

## Praktika

Aug. 2008 – Nov. 2008	<b>Auslandspraktikum</b> <i>Ruhr- Universität Bochum am Standort Vietnam (Hanoi)</i> BMBF-Projekt: Research Association Mining and Environment (RAME) in Vietnam, Provinz Quang Ninh  <ul style="list-style-type: none"><li>• Recherche zum aktuellen Zustand der Umwelt in Vietnam,</li><li>• Feldarbeiten zum Teilprojekt: Entwicklung von Konzepten zur Stabilisierung von Berghalden und Reduktion der von ihnen ausgehenden Umweltwirkungen</li></ul>
-----------------------	--



- Feldarbeiten zum Teilprojekt: Konzepte zur Haldenrekultivierung und Kartierung der vorhandenen Vegetation und Bodenverhältnisse
- Aufbau eines Umweltinformationssystems

### **Inlandspraktika**

*Staatliches Amt Umwelt und Natur Neubrandenburg*

*Abteilung Boden und Wasser*

*Dezernat 340*

Aug. 2007 - Okt. 2007	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neuberechnung des Gebietsniederschlags für das Amtsgebiets des StAUN Neubrandenburg</li> <li>• Teilnahme am Messdienst sowie Aufbereitung der Grundlagendaten</li> </ul>
Aug. 2006 - Sep. 2006	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswertung von Lysimeterdaten (Verdunstungsermittlung) zur Berechnung der Grundwasserneubildungsrate</li> <li>• Beprobung von Gewässern zur Feststellung der Trophie nach LAWA Richtlinien</li> <li>• Erarbeitung von Abflussstatistiken und Korrektur von Langzeitreihen</li> </ul>
Feb. 2006 - Mrz. 2006	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abfluss- und Grundwasserstandsmessungen</li> <li>• Entnahmen von Wasserproben und Vorortbestimmung von Parametern</li> </ul>

### **Stipendium**

Sep. 2013 – Sep. 2015	Landesgraduierten Stipendium (Universität Rostock)
-----------------------	--

### **Fachverbandsmitgliedschaften**

Feb. 2018 – heute	Mitglied der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)
Jan. 2008 – Dez. 2010	Hafentechnische Gesellschaft e.V (HTG)

### **Reviewer für Journal**

2018	Science of the Total Environment
------	----------------------------------

### **Nicht akademische Tätigkeiten**

Nov. 2017 – heute	Ehrenamt: Vizepräsident des Ju-Jutsu Verbands M-V e.V.
Jan. 2015 – heute	Ehrenamt: Vereinsvorstand des Ju-Jutsu-Team Rostock e.V.
Okt. 2003 – Jul. 2004	Grundwehrdienst

## **In dieser Reihe bisher erschienen**

### **Band I**

10. DIALOG Abfallwirtschaft MV

– Von der Abfallwirtschaft zur Energiewirtschaft.

*Tagungsband, erschienen im Juni 2007, ISBN 987-3-86009-004-6*

### **Band II**

Ellen-Rose Trübger

Entwicklung eines Ansatzes zur Berücksichtigung der ungesättigten Zone bei der Grundwassersimulation von Feuchtgebieten.

*Dissertation, erschienen im August 2007, ISBN 978-3-86009-006-0*

### **Band III**

René Dechow

Untersuchungen verschiedener Ansätze der Wasserhaushalts- und Stofftransportmodellierung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in Stickstoffhaushaltsmodellen.

*Dissertation, erschienen im September 2007, ISBN 978-3-86009-016-9*

### **Band IV**

Carolyn Wloczyk

Entwicklung und Validierung einer Methodik zur Ermittlung der realen Evapotranspiration anhand von Fernerkundungsdaten in Mecklenburg-Vorpommern.

*Dissertation, erschienen im September 2007, ISBN 978-3-86009-009-1*

### **Band 5**

1. Rostocker Bioenergieforum.

Bioenergieland Mecklenburg-Vorpommern.

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2007, ISBN 978-3-86009-013-8*

### **Band 6**

Kulturtechniktagung 2007.

Ostseeverseuchung und Flächenentwässerung.

*Tagungsband, erschienen im Januar 2008, ISBN 978-3-86009-018-3*

### **Band 7**

Enrico Frahm

Bestimmung der realen Evapotranspiration für Weide (*Salix* spp.) und Schilf (*Phragmites australis*) in einem nordostdeutschen Flusstalmoor.

*Dissertation, erschienen im Mai 2008, ISBN 978-3-86009-023-7*

**Band 8**

Jenny Haide

Methode zur Quantifizierung der Einflüsse auf Vorgangsdauern lohnintensiver Arbeiten am Beispiel von Pflasterarbeiten.

*Dissertation, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-024-4*

**Band 9**

11. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Chancen und Risiken für die deutsche Abfallwirtschaft im Ausland.

*Tagungsband, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-029-9*

**Band 10**

Stefan Cantré

Ein Beitrag zur Bemessung geotextiler Schläuche für die Entwässerung von Baggergut.

*Dissertation, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-032-9*

**Band 11**

Birgit Wüstenberg

Praxis der Standortwahl von Sportboothäfen im Küstenbereich Mecklenburg-Vorpommerns und Entwicklung einer Bewertungsmethode als Planungshilfe.

*Dissertation, erschienen im Juli 2008, ISBN 978-3-86009-033-6*

**Band 12**

André Clauß

Erhöhung der Trinkwasserversorgungssicherheit in Havarie- und Krisensituationen durch neue Handlungsalgorithmen sowie Einbeziehung bisher ungenutzter Ressourcen am Beispiel von Bergbaugrubenwasser.

*Dissertation, erschienen im September 2008, ISBN 978-3-86009-037-4*

**Band 13**

Peter Degener

Sickerwasserkreislauf zur Behandlung von Sickerwässern der aerob-biologischen Restabfallbehandlung (Restabfallrotte).

*Dissertation, erschienen im Oktober 2008, ISBN 978-3-86009-043-5*

**Band 14**

2. Rostocker Bioenergieforum

Innovationen für Klimaschutz und wirtschaftliche Entwicklung.

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2008, ISBN 978-3-86009-044-2*

**Band 15**

7. Rostocker Abwassertagung

Fortschritte auf dem Gebiet der Abwasserentsorgung.

*Tagungsband, erschienen im November 2008, ISBN 978-3-86009-045-9*

**Band 16**

Christian Noß

Strömungsstrukturen kleiner naturnaher Fließgewässer unter Berücksichtigung von Turbulenztheorie und Dispersionsmodellen.

*Dissertation, erschienen im Januar 2009, ISBN 978-3-86009-054-1*

**Band 17**

Ralf Schröder

Entwicklung von Möglichkeiten zur Messung der N<sub>2</sub>-Übersättigung sowie Methoden zur Reduzierung der Schwimmschlamm Bildung.

*Dissertation, erschienen im Februar 2009, ISBN 978-3-86009-055-8*

**Band 18**

Elmar Wisotzki

Bodenverfestigungen mit Kalk-Hüttensand-Gemischen.

*Dissertation, erschienen im April 2009, ISBN 978-3-86009-059-6*

**Band 19**

Ramez Mashkook

Untersuchungen zur Adsorption und biologischen Aktivität an Aktivkohlefilter unter den Bedingungen der Wasseraufbereitung im Wasserwerk Rostock.

*Dissertation, erschienen im April 2009, ISBN 978-3-86009-060-2*

**Band 20**

Torsten Birkholz

Handlungserfordernisse und Optimierungsansätze für kommunale Ver- und Entsorgungsunternehmen im Zusammenhang mit demografischen Veränderungen im ländlichen Raum aufgezeigt an einem Beispiel in Mecklenburg-Vorpommern.

*Dissertation, erschienen im Mai 2009, ISBN 978-3-86009-061-9*

**Band 21**

12. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfallwirtschaft.

*Tagungsband, erschienen im Juni 2009, ISBN 978-3-86009-062-6*

**Band 22**

Thomas Fritz

Entwicklung, Implementierung und Validierung eines praxisnahen Verfahrens zur Bestimmung von Biogas- bzw. Methanerträgen.

*Dissertation, erschienen im Oktober 2009, ISBN 978-3-86009-065-7*

**Band 23**

3. Rostocker Bioenergieforum

Bioenergie – Chance und Herausforderung für die regionale und globale Wirtschaft.

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2009, ISBN 978-3-86009-065-8*

**Band 24**

Muhammad Mariam

Analyse von Gefahrenpotenzialen für die Trinkwasserversorgung der Stadt Rostock unter besonderer Berücksichtigung von Schadstoffausbreitungsvorgängen in der Warnow.

*Dissertation, erschienen im Februar 2010, ISBN 978-3-86009-078-7*

**Band 25**

Manja Steinke

Untersuchungen zur Behandlung von Abwässern der Fischverarbeitungsindustrie.

*Dissertation, erschienen im Juni 2010, ISBN 978-3-86009-085-5*

**Band 26**

13. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Die Kreislauf- und Abfallwirtschaft im Wandel. Wohin gehen die rechtlichen und technischen Entwicklungen?

*Tagungsband, erschienen im Juni 2010, ISBN 978-3-86009-087-9*

**Band 27**

4. Rostocker Bioenergieforum

Zukunftstechnologien für Bioenergie

*Tagungsband, erschienen im Oktober 2010, ISBN 978-3-940364-12-8*

**Band 28**

Dirk Banemann

Einfluss der Silierung und des Verfahrensablaufs der Biomassebereitstellung auf den Methanertrag unter Berücksichtigung eines Milchsäurebakteriensilierungsmittel

*Dissertation, erschienen im Januar 2011, ISBN 978-3-86009-087-9*

**Band 29**

14. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Abfall als Wertstoff- und Energiereserve

*Tagungsband, erschienen im Juni 2011, ISBN 978-3-940364-18-0*

**Band 30**

5. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im November 2011, ISBN 978-3-940364-20-3*

**Band 31**

8. Rostocker Abwassertagung

Erhöhung der Effektivität von Abwasserentsorgungsanlagen

*Tagungsband, erschienen im November 2011, ISBN 978-3-86009-120-3*

**Band 32**

6. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2012, ISBN 978-3-940364-27-2*

**Band 33**

Ishan Machlouf

Untersuchungen zur Nitratelimination bei der Trinkwasseraufbereitung unter Berücksichtigung syrischer Verhältnisse

*Dissertation, erschienen im März 2013, ISBN 978-3-86009-204-0*

**Band 34**

Ralph Sutter

Analyse und Bewertung der Einflussgrößen auf die Optimierung der

Rohbiogasproduktion hinsichtlich der Konstanz von Biogasqualität und -menge

*Dissertation, erschienen im März 2013, ISBN 978-3-86009-202-6*

**Band 35**

Wolfgang Pfaff-Simoneit

Entwicklung eines sektoralen Ansatzes zum Aufbau von nachhaltigen Abfallwirtschaftssystemen in Entwicklungsländern vor dem Hintergrund von Klimawandel und Ressourcenverknappung

*Dissertation, erschienen im Mai 2013, ISBN 978-3-86009-203-3*

**Band 36**

7. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2013, ISBN 978-3-86009-207-1*

**Band 37**

Markus Helftewes

Modellierung und Simulation der Gewerbeabfallaufbereitung vor dem Hintergrund der Outputqualität, der Kosteneffizienz und der Klimabilanz

*Dissertation, erschienen im Oktober 2013, ISBN 978-3-86009-402-0*

**Band 38**

Jan Stefan Riha

Detektion und Quantifizierung von Cyanobakterien in der Ostsee mittels Satellitenfernerkundung

*Dissertation, erschienen im Oktober 2013, ISBN 978-3-86009-403-7*

**Band 39**

Peter Helmke

Optimierung der Verarbeitungs-, Gebrauchs- und Entsorgungseigenschaften eines naturfaserverstärkten Kunststoffes unter Berücksichtigung automobiler Anforderungen

*Dissertation, erschienen im November 2013, ISBN 978-3-86009-404-4*

**Band 40**

Andrea Siebert-Raths

Modifizierung von Polylactid (PLA) für technische Anwendungen

Verfahrenstechnische Optimierung der Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften

*Dissertation, erschienen im Januar 2014 ISBN 978-3-86009-405-1*

**Band 41**

Fisiha Getachew Argaw

Agricultural Machinery Traffic Influence on Clay Soil Compaction as Measured by the Dry Bulk Density

*Dissertation, erschienen im Januar 2014 ISBN 978-3-86009-406-8*

**Band 42**

Tamene Adugna Demissie

Climate change impact on stream flow and simulated sediment yield to Gilgel Gibe 1 hydropower reservoir and the effectiveness of Best Management Practices

*Dissertation, erschienen im Februar 2014 ISBN 978-3-86009-407-5*

**Band 43**

Paul Engelke

Untersuchungen zur Modellierung des Feststofftransports in Abwasserkanälen: Validierung in SIMBA®

*Dissertation, erschienen im Februar 2014 ISBN 978-3-86009-408-2*

**Band 44**

16. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft

*Tagungsband, erschienen im April 2014, ISBN 978-3-86009-410-5*

**Band 45**

8. Rostocker Bioenergieforum, 19.-20. Juni 2014 an der Universität Rostock

*Tagungsband, erschienen im Juni 2014, ISBN 978-3-86009-412-9*

**Band 46**

Abschlussbericht Projekt CEMUWA – Climate protection, natural resources management and soil improvement by combined Energetic and Material Utilization of lignocellulosic agricultural Wastes and residues

*Projektbericht, erschienen im September 2014, ISBN 978-3-86009-413-6*

**Band 47**

8. Rostocker Baggergutseminar, 24.-25. September 2014 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im September 2014, ISBN 978-3-86009-414-3*

**Band 48**

Michael Kuhn  
Mengen und Trockenrückstand von Rechengut kommunaler Kläranlagen  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2014 ISBN 978-3-86009-415-0*

**Band 49**

8. Rostocker Abwassertagung, 10.-11. November 2014 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im November 2014, ISBN 978-3-86009-416-7*

**Band 50**

Mulugeta Azeze Belete  
Modeling and Analysis of Lake Tana Sub Basin Water Resources Systems,  
Ethiopia  
*Dissertation, erschienen im Dezember 2014 ISBN 978-3-86009-422-8*

**Band 51**

Daniela Dressler  
Einfluss regionaler und standortspezifischer Faktoren auf die Allgemeingültigkeit  
ökologischer und primärenergetischer Bewertungen von Biogas  
*Dissertation, erschienen im Mai 2015 ISBN 978-3-86009-424-2*

**Band 52**

9. Rostocker Bioenergieforum, 18.-19. Juni 2015 in Rostock  
*Tagungsband, erschienen im November 2014, ISBN 978-3-86009-425-9*

**Band 53**

Nils Engler  
Spurenelementkonzentrationen und biologische Aktivität in NaWaRo-Biogas-  
fermentern  
*Dissertation, erschienen im September 2015 ISBN 978-3-86009-427-3*

**Band 54**

Thomas Schmidt  
Möglichkeiten der Effizienzsteigerung bei der anaeroben Vergärung  
von Weizenschlempe  
*Dissertation, erschienen im Oktober 2015 ISBN 978-3-86009-428-0*



**Band 55**

Thomas Dorn

Principles, Opportunities and Risks associated with the transfer of environmental technology between Germany and China using the example of thermal waste disposal

*Dissertation, erschienen im Dezember 2015 ISBN 978-3-86009-429-7*

**Band 56**

Uwe Holzhammer

Biogas in einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur mit hohen Anteilen fluktuierender Erneuerbarer Energien

*Dissertation, erschienen im Dezember 2015 ISBN 978-3-86009-430-3*

**Band 57**

17. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft,

15. Juni 2016 in Rostock,

*Tagungsband, erschienen im Juni 2016, ISBN 978-3-86009-432-7*

**Band 58**

10. Rostocker Bioenergieforum, 16.-17. Juni 2016 in Rostock

*Tagungsband, erschienen im Juni 2016, ISBN 978-3-86009-433-4*

**Band 59**

Michael Friedrich

Adaptation of growth kinetics and degradation potential of organic material in activated sludge

*Dissertation, erschienen im Juli 2016 ISBN 978-3-86009-434-1*

**Band 60**

Nico Schulte

Entwicklung von Qualitätsprüfungen für die haushaltsnahe Abfallsammlung im Holsystem

*Dissertation, erschienen im Juli 2016 ISBN 978-3-86009-435-8*

**Band 61**

Ullrich Dettmann

Improving the determination of soil hydraulic properties of peat soils at different scales

*Dissertation, erschienen im September 2016 ISBN 978-3-86009-436-5*

**Band 62**

Anja Schreiber

Membranbasiertes Verfahren zur weitergehenden Vergärung

von feststoffreichen Substraten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

*Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-446-4*

**Band 63**

André Körte

Entwicklung eines selbstgängigen statischen Verfahrens zur biologischen Stabilisierung und Verwertung organikreicher Abfälle unter extrem ariden Bedingungen für Entwicklungs- und Schwellenländer, am Beispiel der Stadt Teheran

*Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-447-1*

**Band 64**

Ayman Elnaas

Actual situation and approach for municipal solid waste treatment in the Arab region

*Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-448-8*

**Band 65**

10. Rostocker Abwassertagung, Wege und Werkzeuge für eine zukunftsfähige Wasserwirtschaft im norddeutschen Tiefland, 8. November 2016 in Rostock

*Tagungsband, erschienen im November 2016, ISBN 978-3-86009-449-5*

**Band 66**

Gunter Weißbach

Mikrowellen-assistierte Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Reststoffe

*Dissertation, erschienen im November 2016 ISBN 978-3-86009-450-1*

**Band 67**

Leandro Janke

Optimization of anaerobic digestion of sugarcane waste for biogas production in Brazil

*Dissertation, erschienen im Mai 2017 ISBN 978-3-86009-454-9*

**Band 68**

11. Rostocker Bioenergieforum, 22.-23. Juni 2017 in Rostock

*Tagungsband, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-455-6*

**Band 69**

Claudia Demmig

Einfluss des Erntezeitpunktes auf die anaerobe Abbaukinetik der Gerüstsubstanzen im Biogasprozess

*Dissertation, erschienen im Juli 2017, ISBN 978-3-86009-456-3*

**Band 70**

Christian Koepke

Die Ermittlung charakteristischer Bodenkennwerte der Torfe und Mudden Mecklenburg-Vorpommerns als Eingangsparameter für erdstatische Berechnungen nach Eurocode 7 / DIN 1054

*Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-457-0*

**Band 71**

Sven-Henning Schlömp

Geotechnische Untersuchung und Bewertung bautechnischer Eignung von Müllverbrennungsschlacken und deren Gemischen mit Böden

*Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-458-7*

**Band 72**

Anne-Katrin Große

Baggergut im Deichbau – Ein Beitrag zur geotechnischen Charakterisierung und Erosionsbeschreibung feinkörniger, organischer Sedimente aus dem Ostseeraum zur Einschätzung der Anwendbarkeit

*Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-459-4*

**Band 73**

Thomas Knauer

Steigerung der Gesamteffizienz von Biogasanlagen durch thermische Optimierung

*Dissertation, erschienen im Juli 2017, ISBN 978-3-86009-460-0*

**Band 74**

Mathhar Bdour

Electrical power generation from residual biomass by combustion in externally fired gas turbines (EFGT)

*Dissertation, erschienen im August 2017, ISBN 978-3-86009-468-6*

**Band 75**

Johannes Dahlin

Vermarktungsstrategien und Konsumentenpräferenzen für Dünger und Erden aus organischen Reststoffen der Biogasproduktion

*Dissertation, erschienen im September 2017, ISBN 978-3-86009-469-3*

**Band 76**

Sören Weinrich

Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen

Systematische Vereinfachung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)

*Dissertation, erschienen im März 2018, ISBN 978-3-86009-471-6*

**Band 77**

18. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft

*Tagungsband, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-472-3*

**Band 78**

12. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-473-0*

**Band 79**

Tatyana Koegst

Screening approaches for decision support in drinking water supply

*Dissertation, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-474-7*

**Band 80**

Liane Müller

Optimierung des anaeroben Abbaus stickstoffhaltiger Verbindungen durch den Einsatz von Proteasen

*Dissertation, erschienen im September 2018, ISBN 978-3-86009-475-4*

**Band 81**

Projektbericht Wasserwirtschaft

KOGGE – **K**ommunale **G**ewässer **G**emeinschaftlich **E**ntwickeln

Ein Handlungskonzept für kleine urbane Gewässer am Beispiel der Hanse- und Universitätsstadt Rostock

*Projektbericht, erschienen im September 2018, ISBN 978-3-86009-476-1*

**Band 82**

Adam Feher

Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit von Mikronährstoffen für den Biogasprozess

*Dissertation, erschienen im Oktober 2018, ISBN 978-3-86009-477-8*

**Band 83**

Constanze Uthoff

Pyrolyse von naturfaserverstärkten Kunststoffen zur Herstellung eines kohlenstoffhaltigen Füllstoffs für Thermoplasten

*Dissertation, erschienen im November 2018, ISBN 978-3-86009-478-5*

**Band 84**

Ingo Kaundinya

Prüfverfahren zur Abschätzung der Langzeitbeständigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen aus PVC-P für den Einsatz in Dichtungssystemen von Straßentunneln

*Dissertation, erschienen im Dezember 2018, ISBN 978-3-86009-484-6*

**Band 85**

Eric Mauky

A model-based control concept for a demand-driven biogas production

*Dissertation, erschienen im Januar 2019, ISBN 978-3-86009-485-3*

**Band 86**

Michael Kröger

Thermochemical Utilization of Algae with Focus on hydrothermal Processes

*Dissertation, erschienen im Februar 2019, ISBN 978-3-86009-486-0*

**Band 87**

13. Rostocker Bioenergieforum

*Tagungsband, erschienen im Juni 2019, ISBN 978-3-86009-487-7*

**Band 88**

12. Rostocker Abwassertagung

*Tagungsband, erschienen im September 2019, ISBN 978-3-86009-488-4*

**Band 89**

Philipp Stahn

Wasser- und Nährstoffhaushalt von Böden unter Mischkulturen und Trockenstress

*Dissertation, erschienen im Juli 2019, ISBN 978-3-86009-489-1*

**Band 90**

BioBind: Luftgestützte Beseitigung von Verunreinigungen durch Öl mit biogenen Bindern

*Projektbericht, erschienen im September 2019, ISBN 978-3-86009-490-7*

**Band 91**

Jürgen Müller

Die forsthydrologische Forschung im Nordostdeutschen Tiefland: Veranlassung, Methoden, Ergebnisse und Perspektiven

*Habilitation, erschienen im Oktober 2019, ISBN 978-3-86009-491-4*

**Band 92**

Marcus Siewert

Bewertung der Ölhavarievorsorge im deutschen Seegebiet auf Grundlage limitierender Randbedingungen – Ein Beitrag zur Verbesserung des Vorsorgestatus

*Dissertation, erschienen im November 2019, ISBN 978-3-86009-492-1*

**Band 93**

Camilo Andrés Wilches Tamayo

Technical optimization of biogas plants to deliver demand oriented power

*Dissertation, erschienen im Februar 2020, ISBN 978-3-86009-493-8*

**Band 94**

Robert Kopf

Technisches Benchmarking mit Standortqualifikationsstudie biochemischer Energieanlagenprojekte (Beispiel Biogas)

*Dissertation, erschienen im Februar 2020, ISBN 978-3-86009-494-5*

**Band 95**

14. Rostocker Bioenergieforum und 19. DIALOG Abfallwirtschaft MV  
*Tagungsband, erschienen im Juni 2020, ISBN 978-3-86009-507-2*  
DOI [https://doi.org/10.18453/rosdok\\_id00002650](https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002650)

**Band 96**

Safwat Hemidat  
Feasibility Assessment of Waste Management and Treatment in Jordan  
*Dissertation, erschienen im Juli 2020, ISBN 978-3-86009-509-6*

**Band 97**

Andreas Heiko Metzger  
Verdichtung von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen -  
Untersuchungen zur Lagerungsdichte des Fugenmaterials  
*Dissertation, erschienen im Juli 2020, ISBN 978-3-86009-510-2*

**Band 98**

Ying Zhou  
Research on Utilization of Hydrochars Obtained by the Organic Components of  
Municipal Solid Waste  
*Dissertation, erschienen im November 2020, ISBN 978-3-86009-515-7*

# Schriftenreihe Umweltingenieurwesen

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Band 99

Dissertation

*Mathias Gießler*

Umweltingenieurwesen ■ Wasserwirtschaft

Bd.  
99

Ein prozessbasiertes Modell zur wirtschaftlich-  
technischen Abbildung von Abwasserunter-  
nehmen – Beispielhafte Anwendung für eine  
ländliche Region mit Bevölkerungsrückgang

Schriftenreihe

PROFESSUR

Wasserwirtschaft